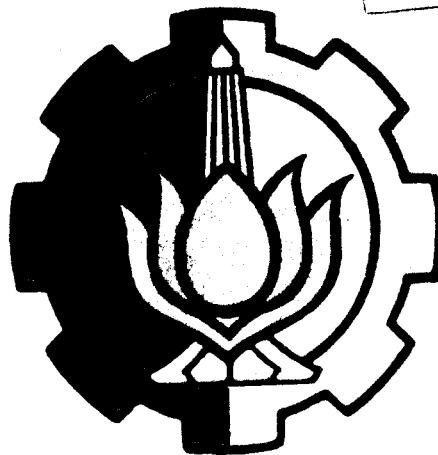


6467/ITS/H/94 ✓

**ELEKTRONIK STARTING SWITCH
MOTOR INDUKSI SATU FASA 1/2 HP
STARTING KAPASITOR**

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Pinjam	04 MAY 1994
Terima Dari	TA
No. Agenda Prp.	2051/B



RSE
621.46
Sud
E-1
1994

OLEH:

ARY SUDIBYO

NRP. 2902201576

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1994**

**ELEKTRONIK STARTING SWITCH
MOTOR INDUKSI SATU FASA 1/2 HP
STARTING KAPASITOR**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro**

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

S u r a b a y a

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing,



Dr. Ir. SOEBAGIO

NIP. 130 325 697

SURABAYA

Pebruari, 1994

ABSTRAK

Dalam industri baik kecil maupun sedang sampai rumah tangga, motor induksi satu fasa banyak digunakan sebagai mesin serba guna karena bentuk yang kecil daya yang tidak terlalu besar dan membutuhkan listrik hanya satu fasa.

Motor induksi satu fasa dengan kapasitor starting merupakan salah satu dari motor induksi satu fasa. Pada saat starting menggunakan rangkaian bantu yang dihubungkan oleh sentrifugal switch. Pada saat melepaskan rangkaian starting selalu timbul bunga api yang lama kelamaan menyebabkan kerusakan dan dapat menyebabkan motor gagal starting.

Elektronik starting switch sebagai pengganti mekanik sentrifugal switch yang dapat meniadakan bunga api dan pelepasan rangkaian starting dapat diatur, lebih cepat mencapai putaran maksimal karena torsi mula besar.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, karena dengan hanya ridho-NYA penyusun dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

ELEKTRONIK STARTING SWITCH MOTOR INDUKSI

SATU FASA 1/2 HP KAPASITOR STARTING

Tugas Akhir yang berbobot 6 SKS ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat akademis, guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Sadar akan keterbatasan kemampuan yang ada pada diri penyusun sebagai manusia biasa, maka segala kritik dan saran yang dapat memperbaiki Tugas Akhir ini sangat penyusun harapkan.

Akhir kata semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang memerlukannya.

Surabaya, Januari 1994

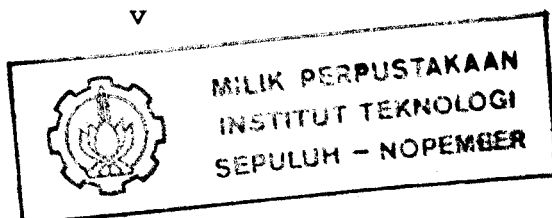
Penyusun

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak sekali bantuan dari berbagai pihak, dan dengan telah selesainya penyusunan buku Tugas Akhir ini penyusun mengucapkan Terima Kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak DR. Ir. Subagio, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan selama penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. R. Wahyudi, selaku dosen wali yang telah memberikan bimbingan dan saran selama menempuh perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Moch. Salehudin, MEng.Sc, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan segenap dosen di lingkungan Teknik Elektro FTI ITS.
4. Bapak, Ibu dan saudara-saudaraku yang telah banyak memberikan bimbingan dan semangat selama kuliah hingga selesainya Tugas Akhir ini.
5. Seluruh rekan-rekan dan pihak-pihak lain yang telah banyak membantu secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan yang telah banyak memberikan bantuan dalam penyusunan dan penyelesaian Tugas Akhir ini, Amien.



DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Sistematika Pembahasan	4
1.6 Relevansi	5
BAB II MOTOR INDUKSI SATU FASA STARTING KAPASITOR	
2.1 Operasi Motor Induksi Satu Fasa	7
2.1.1 Operasi Dalam Keadaan Steady State	7
2.1.2 Menentukan Parameter Dari Rangkaian Pengganti	16
2.1.3 Torsi Starting Motor Induksi Satu Fasa	18

2.2	Motor Induksi Satu Fasa Starting Kapasitor	20
2.2.1	Rangkaian Ekivalen Motor Induksi	
	Starting Kapasitor	23
2.2.2	Torsi Starting Motor Kapasitor . . .	26
	Starting Kapasitor	23
BAB III T R I A C		
3.1	Karakteristik Triac	30
3.2	Penyalan (Triggering)	31
3.3	Pemadaman (Turn-Off)	33
3.4	Kontrol Sudut Fasa	34
3.5	Pembatasan Arus Dan Tegangan Kritis . .	35
	3.5.1 Pembatasan di/dt	35
	3.5.2 Pembatasan dv/dt	37
BAB IV ELEKTRONIK STARTING SWITCH MOTOR INDUKSI SATU FASA		
4.1	Prinsip Kerja Motor Induksi Satu Fasa	
	Starting Kapasitor	41
4.2	Konstruksi Sentrifugal Switch	42
4.3	Rangkaian Elektronik Starting Switch . . .	42
	4.3.1 Prinsip Kerja Rangkaian	43
	4.3.2 Analisa Rangkaian Motor Induksi	
	Satu Fasa 1/2 Hp Starting Kapasitor	44
	4.3.3 Analisa Rangkaian Switch Triac . .	59
BAB V KESIMPULAN		67
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 KONSTRUKSI MOTOR INDUKSI SATU FASA	7
2.2 DIAGRAM MOTOR INDUKSI SATU FASA	8
2.3 DIAGRAM VEKTOR GELOMBANG MMF DARI STATOR . .	10
2.4 RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI SATU FASA .	12
2.5 KURVA KECEPATAN-TORSI MOTOR INDUKSI SATU FASA	14
2.6 RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI SATU FASA .	17
2.7 MOTOR INDUKSI SATU FASA SAAT STARTING . . .	19
2.8 MOTOR INDUKSI SATU FASA STARTING KAPASITOR	21
2.9 RANGKAIAN MOTOR INDUKSI SATU FASA STARTING KAPASITOR PADA SAAT STARTING	22
2.10 MEDAN PUTAR PADA WAKTU MOTOR KAPASITOR STARTING	24
2.11 RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI SATU FASA KAPASITOR STARTING	25
2.12 RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI KAPASITOR STARTING SAAT START	27
3.1 (A) SIMBOL DAN TERMINAL TRIAC	29
(B) STRUKTUR DASAR TRIAC	29
3.2 KARAKTERISTIK TEGANGAN-ARUS AC TRIAC	30
3.3 (A) ARAH ALIRAN ARUS GATE DAN BEBAN PADA TRIAC DIBIAS MAJU	32

3.3	(B) ARAH ALIRAN ARUS GATE DAN BEBAN PADA TRIAC	
	DIBIAS TERBALIK.	32
3.4	PENYALAN TRIAC	34
3.5	RANGKAIAN PENYEARAH SETENGAH GELOMBANG	36
3.6	RANGKAIAN TRAC DAN BEBAN TANPA SNUBBER CIRCIUT	38
3.7	RANGKAIAN TRIAC DENGAN SNUBBER CIRCUIT	39
4.1	MEKANIK SENTRIFUGAL SWITCH	42
4.2	RANGKAIAN ELEKTRONIK STARTING SWITCH	43
4.3	TEST MOTOR TANPA BEBAN	45
4.4	LOCKED TEST MOTOR	46
4.5	RANGKAIAN EKIVALEN TANPA BEBAN	48
4.6	RANGKAIAN EKIVALEN BERBEBAN	51
4.7	RANGKAIAN EKIVALEN BEBAN RATED	54
4.8	RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR KAPASITOR SAAT STARTING (S=1)	56
4.9	KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI SATU FASA 1/2 HP STARTING KAPASITOR	58
4.10	RANGKAIAN TRIAC SEBAGAI SWITCH PADA MOTOR INDUKSI SATU FASA DENGAN KAPASITOR SEBAGAI STARTING	59
4.11	KECEPATAN SEBAGAI FUNGSI DARI TEGANGAN TRIGGER GATE TRIAC	62
4.12	ARUS IM YANG MENGALIR PADA R1 SEBAGAI TRIGGER.	62
4.13	SINYAL TEGANGAN PADA GATE DAN TEGANGAN SUMBER	65
4.14	SINYAL TEGANGAN PADA R1 PADA SAAT MOTOR START	65
4.15	ARUS YANG MENGALIR PADA TERMINAL TRIAC	66
4.16	ARUS TOTAL YANG MENGALIR PADA SAAT MOTOR START	66

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
4-1 ARUS IM(RMS) TERHADAP SLIP	61

BAB I

P E N D A H U L U A N

1.1 LATAR BELAKANG

Didalam era industrialisasi dan perkembangan pembangunan yang semakin pesat, serta kemajuan dibidang teknologi yang menyebabkan lajunya bidang industri baik industri kecil sampai industri besar untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan yang diperlukan dalam masa pembangunan yang sedang berlangsung.

Dalam industri pemakaian motor adalah sangat dominan sebagai alat bantu penggerak peralatan yang lain sehingga mempercepat proses kerja untuk menghasilkan benda-benda berupa barang untuk memenuhi kebutuhan pasar yang semakin banyak permintaan.

Untuk memenuhi kebutuhan penggerak peralatan industri umumnya digunakan motor induksi. Motor induksi yang menghasilkan output tenaga mekanik dihubungkan oleh motor shaft dengan peralatan lain. Motor induksi ini sangat banyak penggunaannya pada industri dan pemakai energi listrik komersial. Motor induksi lebih populer karena kesederhanaan dan biaya operasional yang rendah, dihubungkan dengan kapasitas overload yang pantas, kebutuhan servis atau pemeliharaan yang minimal, dan efisiensi yang baik.

Penggunaan motor induksi sebagai penggerak untuk peralatan-peralatan bantu yang digunakan dalam suatu industri kecil sampai industri besar semakin banyak dipakai seperti untuk kipas angin (blower), penggerak pompa air atau sebagai mesin gerinda dan lain sebagainya.

Untuk beban yang memerlukan tenaga mekanik yang besar biasanya digunakan motor induksi tiga phasa sedang sebagai peralatan penunjang dipakai motor induksi satu phasa yang lebih kecil torsiya.

Motor induksi satu phasa yang mempunyai daya kecil yang bervariasi antara dibawah 5 Hp yang mempunyai banyak kegunaan khusus adalah lebih tepat untuk kebutuhan penggerak peralatan yang tak memerlukan suatu torsi yang sangat besar dan mesin yang lebih kecil dan lebih fleksibel digunakan serta biaya perawatan mesin murah.

Dengan ditunjang semakin banyaknya komponen elektronika semikonduktor yang mempunyai kemampuan dapat mengatur kecepatan motor, penggunaan komponen mekanik motor dapat diganti sehingga dari karakteristik motor yang ada dan dibuat rangkaian sedemikian rupa sehingga perlakuan motor dapat diatur sesuai dengan keinginan pemakai.

Motor induksi satu phasa dengan kapasitor starting sebagai peralatan bantu yang sangat umum dipakai baik industri sedang, kecil sampai untuk keperluan rumah tangga.

Motor induksi satu phasa kapasitor starting merupakan motor yang lebih umum dipakai untuk peralatan - peralatan yang memerlukan tenaga mekanik yang tidak besar misalnya sebagai penggerak kipas, mesin gerinda, penggerak pompa air dan lain-lain, yang membutuhkan supply tegangan satu phasa dan dipakai jika diperlukan dan sering terjadi pemakaian yang berulang-ulang, sehingga proses starting lebih sering terjadi pada motor.

1.2. PERMASALAHAN

Motor induksi satu phasa kapasitor starting ini pada saat supply tegangan masuk, arus yang dibutuhkan besar yang dipakai sebagai tenaga penggerak torsi awal pada rotornya. Setelah rotor berputar antara 75% dari kecepatan sinkronnya, kapasitor yang berfungsi sebagai starting akan terlepas dari rangkaian, sehingga hanya belitan utama saja yang memberikan torsi sehingga rotor tetap berputar. Terlepasnya kapasitor starting ini tergantung dari sentrifugal switch yang ada pada motor.

Sebagai motor yang dipakai hanya jika diperlukan saja untuk suatu keperluan tertentu, menyebabkan sering terjadinya starting. Switch mekanik untuk melepas kapasitor starting bila terjadi kerusakan menyebabkan motor tidak dapat berputar dan menyebabkan arus pada belitan utama menjadi naik sehingga belitan utamanya rusak terbakar.

Sentrifugal switch ini dapat digantikan dengan rangkaian elektronika daya, sehingga kegagalan yang menyebabkan kerusakan motor dapat dicegah dan dengan adanya Triac sebagai switching ini meniadakan terjadinya bunga api pada waktu pelepasan dan kecepatan pelepasan dapat diatur, serta pemeliharaan motor dapat minimal.

1.3 TUJUAN

Pembuatan elektronik starting switch motor induksi satu fasa 1/2 Hp starting kapasitor untuk menggantikan fungsi dari mekanik sentrifugal switch.

1.4 PEMBATASAN MASALAH

Pembuatan alat elektronik sebagai pengganti dari sentrifugal switch yang ada didalam motor yang merupakan switch mekanik, pada Tugas Akhir ini dibahas pembuatan elektronik starting switch untuk motor induksi satu fasa kapasitor starting untuk kapasitas daya 1/2 Hp.

1.5 SISTEMATIKA PEMBAHASAN

Sistematika pembahasan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab, yaitu :

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, permasalahan, pembatasan masalah, sistematika pembahasan dan relevansi dari penyusunan tugas akhir ini.

BAB II : MOTOR INDUKSI SATU PHASA KAPASITOR STARTING

Berisi tentang pembahasan teori motor induksi

satu fasa, karakteristik motor induksi satu fasa kapasitor starting.

BAB III : TRIAC

Berisi tentang pembahasan teori komponen elektronika daya Triac, karakteristik dari Triac, rangkaian switching dengan Triac.

BAB IV : PEMBUATAN ALAT ELEKTRONIK STARTING SWITCH MOTOR INDUKSI SATU FASA.

Berisi tentang pembahasan pembuatan alat dan analisa rangkaian starting switch motor induksi satu fasa kapasitor starting.

BAB V : KESIMPULAN

Berisi kesimpulan dari pembuatan alat elektronik starting switch motor induksi satu fasa kapasitor starting.

1.6 RELEVANSI

Pembuatan alat elektronik starting switch motor induksi satu fasa untuk motor kapasitas 1/2 Hp dapat dimungkinkan untuk motor induksi satu fasa dengan kapasitas yang lebih besar.

BAB II

MOTOR INDUKSI SATU FASA

Motor induksi satu fasa banyak digunakan pada peralatan rumah tangga, industri kecil, industri sedang, dan komersial, misalnya digunakan sebagai penggerak pompa air, air conditioner (AC), blower, frezeer, mesin cuci, mesin perkakas, mesin penggilingan dan sebagainya. Motor induksi satu fasa ini hanya menggunakan listrik satu fasa dan mempunyai rating kecil sampai sedang.

Motor induksi satu fasa dapat dikelompokkan berdasarkan konstruksinya :

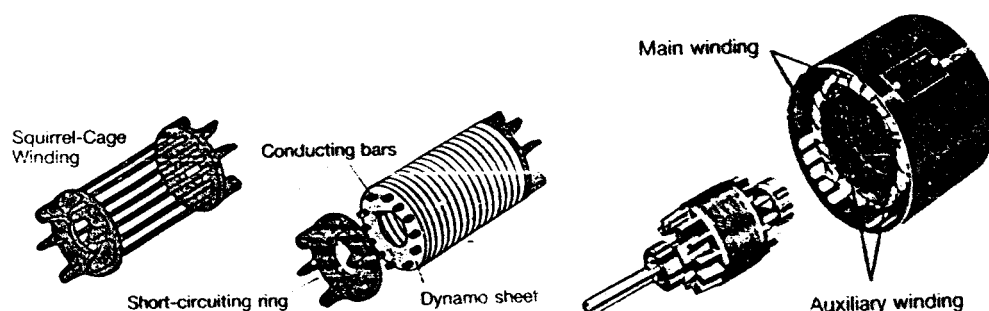
1. Split phase motor
2. Capacitor motor terdiri dari :
 - a. Start Capacitor
 - b. Permanent Capacitor
3. Shaded pole motor

Adapun bagian-bagian dari motor induksi satu fasa terdiri dari :

1. Stator yaitu bagian dari motor yang tidak bergerak yaitu badan motor itu sendiri yang terdapat belitan utama dan belitan bantu.

2. Rotor yaitu bagian yang bergerak yang merupakan susunan dari batang-batang konduktor yang kedua ujungnya disatukan oleh cincin yang dibuat oleh bahan konduktor sehingga bentuknya menyerupai sangkar tupai (rotor sangkar

tupai), seperti yang terlihat pada gambar 2.1.



GAMBAR 2.1¹⁾
KONSTRUKSI MOTOR INDUKSI SATU FASA

2.1. OPERASI MOTOR INDUKSI SATU FASA

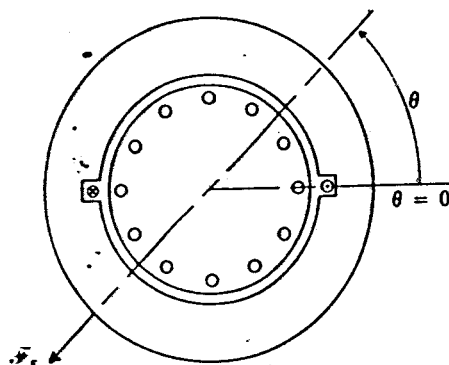
Untuk menjelaskan prinsip kerja dari motor induksi satu fasa dapat diterangkan dengan teori medan putar yang terjadi saat motor beroperasi.

2.1.1 Operasi Dalam Keadaan Steady State.

Kumparan-kumparan dari motor induksi satu fasa digambarkan dalam gambar 2.2, dimana hanya belitan tengah dari kumparan stator saja yang diperlihatkan. Diagram juga menunjukkan arah positif dari arus dalam kumparan.

Sumbu mmf stator perlu berimpit dengan sumbu dari kumparan stator dan karenanya stationer. Karena kumparan diberi eksitasi dengan arus bolak balik, maka dihasilkan mmf

¹⁾ Ernet Hornemann, ELECTRICAL POWER ENGINEERING PROFICIENCY COURSE, Deutsche GTZ GmbH, Eschborn, Germany, 1989, hal 138-140



GAMBAR 2. 2²⁾
 DIAGRAM MOTOR INDUKSI SATU FASA

stator yang stationer tetapi amplitudonya berpulsasi, sehingga besar mmf stator yang bekerja pada celah udara pada suatu sudut θ adalah merupakan fungsi sinusoidal terhadap waktu.

Bila rotor dalam keadaan stationer, arus akan terinduksi dalam kumparan bajing (squirrel cage) melalui suatu tranformer action yang arahnya menimbulkan mmf rotor yang menentang mmf stator. Sumbu mmf rotor berimpit dengan sumbu dari mmf stator, sehingga kopel yang dihasilkan adalah :

$$T = - K F_{eg} F_{rg} \sin \delta \quad \text{N.m.} \quad (2.1)$$

menunjukkan tidak dihasilkannya kopel, karena $\delta = 0$. Jadi dalam keadaan stationer (diam) motor semata-mata bertindak sebagai tranformer, yang mempunyai celah udara

²⁾ Slemon G.R, Straughen A, ELECTRIC MACHINES, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1980, hal 434

dalam rangkaian magnetnya dan kumparan sekunder yang dihubungkan singkat.

Mmf dalam celah udara yang dihasilkan stator adalah

$$F_{sg} = \frac{N_s i_s}{2} \sin \theta \quad \text{A.t.} \quad (2.2)$$

dimana $N_s i_s$ adalah harga puncak dari mmf stator pada suatu saat.

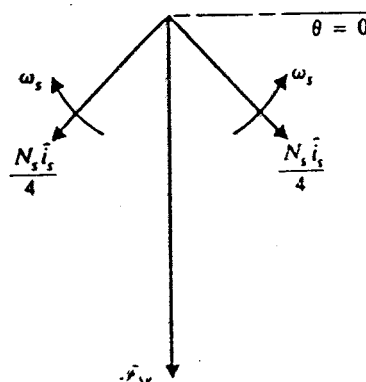
Jika

$$i_s = i_s \cos \omega t \quad \text{A.} \quad (2.3)$$

maka

$$\begin{aligned} F_{sg} &= \frac{N_s i_s}{2} \cos \omega t \sin \theta \\ &= \frac{N_s i_s}{4} \sin (\theta + \omega t) + \frac{N_s i_s}{4} \sin (\theta - \omega t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Tiap term dari ruas kanan dalam persamaan 2.4 menyatakan suatu medan yang putar yang dihasilkan oleh kumparan stator yang konstan, yang terdistribusi secara sinusoidal, seperti halnya medan putar yang dihasilkan oleh kumparan stator tiga fasa. Kedua medan putar tersebut berputar pada arah yang saling berlawanan. Arah dan besar dari kedua mmf tersebut dan resultanturnya terlihat pada gambar 2.3. Jadi medan yang berpulsasi dalam celah udara dari suatu mesin yang stationer dapat dianggap sebagai resultante dari dua medan putar, yang sama besar tetapi berlawanan arah. Tiap medan putar menghasilkan motor induction action pada motor, yang masing - masing menghasilkan kopel yang berlawanan arah, sehingga kopel



GAMBAR 2.3⁹⁾
 DIAGRAM VEKTOR GELOMBANG MMF DARI STATOR

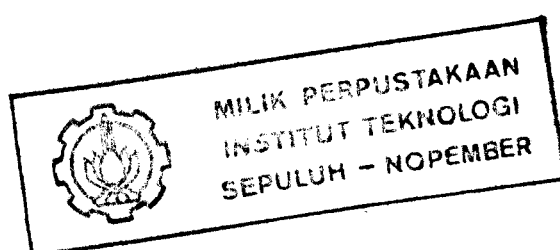
netto pada rotor adalah nol.

Tegangan induksi (emf) dalam kumparan stator dihasilkan oleh gelombang fluksi dalam celah udara, yang stationair dan berpulsasi dijelaskan diatas. Gelombang fluksi dihasilkan oleh resultante dari mmf stator dan rotor. Karena fluksi yang berpulsasi dapat diuraikan menjadi dua fluksi yang berputar, maka rangkaian ekivalen yang menyatakan pengaruh dari kedua medan putar yang berlawanan diatas dapat dipisahkan. Rangkaian ekivalen tersebut dapat dilukiskan dalam gambar 2.4.

Kedua bagian dari rangkaian ekivalen itu mengalirkan arus stator I_s , dan impedansinya menjadi setengahnya karena tegangan induksi total harus sama dengan tegangan sumber. Jadi untuk mesin yang stationer :

$$E_{1f} = E_{1b} = \frac{E_1}{2} \quad (2.5)$$

⁹⁾ Ibid. hal 495



Sekarang apa yang terjadi bila rotor diberi suatu putaran pada arah maju dan berputar pada slip s , terhadap medan putar maju (forward). Dari definisi slip s ,

$$s_f = \frac{(2/p)\omega_s - \omega_m}{(2/p)\omega_s} \quad (2.6)$$

dimana $(2/p)\omega_s$ adalah kecepatan rotasi dari gelombang fluksi maju (forward). Dari persamaan 2.6,

$$\omega_m = (1 - s_f) \omega_s \cdot 2/p \quad \text{rad/s} \quad (2.7)$$

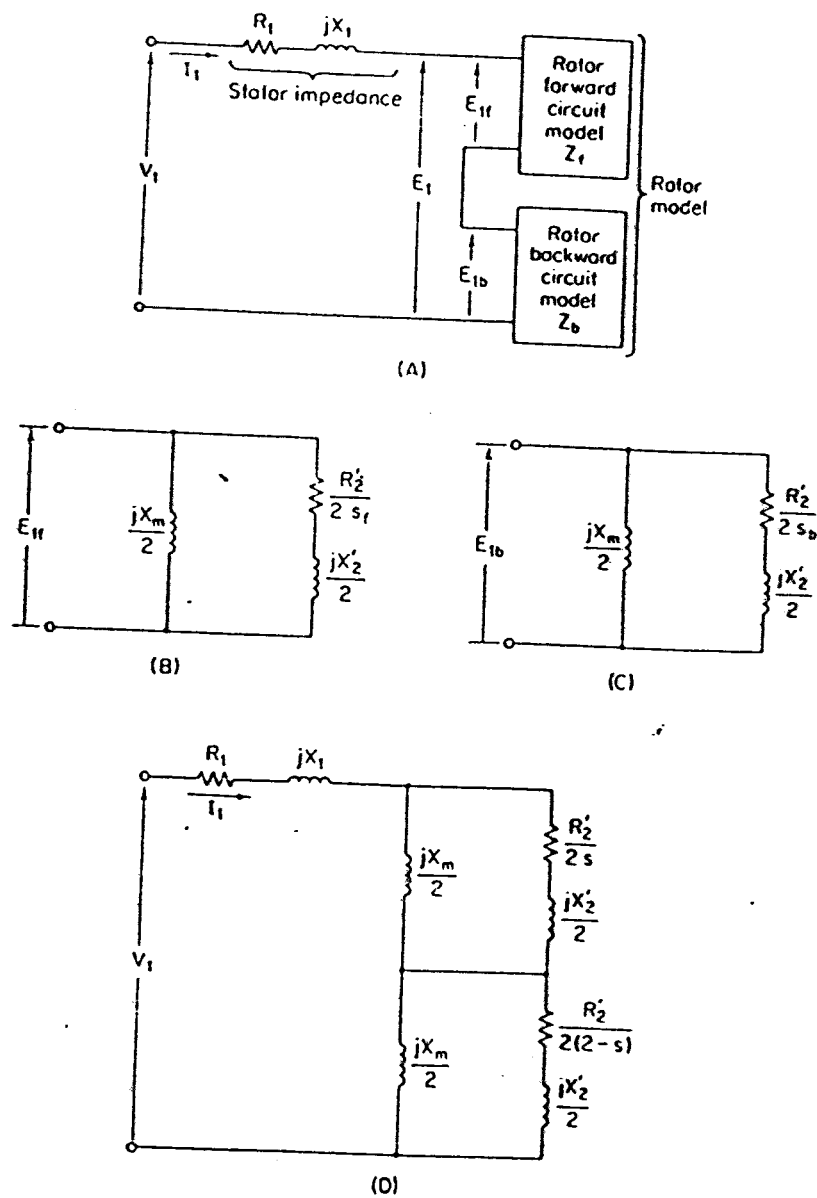
Arus rotor yang diinduksikan oleh gelombang fluksi maju mempunyai slip frekwensi $s_f \omega_s$. Arus rotor ini menghasilkan medan putar pada arah maju (forwar) terhadap rotor pada kecepatan maju sebesar $s_f (2/p)\omega_s$ rad/s dan jadi pada kecepatan $(2/p)\omega_s$ terhadap stator, seperti halnya pada motor 3 fasa. Rangkaian ekivalen motor induksi satu fasa ditunjukkan pada gambar 2.4. Cabang rangkaian yang mengalirkan arus I_{sf} mempunyai impedansi :

$$Z_f = \frac{(jX_m/2) \{[(Rz'/2s) + j(Xz'/2)]\}}{(Rz'/2s) + j[(X_m + Xz')/2]} \quad (2.8)$$

Hal ini ditunjukkan keadaan paralel $jX_m/2$ pada gambar 2.4.

Kecepatan dari gelombang mundur (backward-wave) terhadap stator adalah : $-(2/p)\omega_s$, sehingga rotor slip terhadap gelombang mundur adalah :

$$s_b = \frac{-(2/p)\omega_s - \omega_m}{-(2/p)\omega_s} = 1 + \frac{\omega_m}{(2/p)\omega_s} \quad (2.9)$$



GAMBAR 2.4 ⁴⁾

RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI SATU FASA

- (a) Rangkaian dasar, (b) Model arah maju
(c) Model arah mundur, (d) Rangkaian lengkap

⁴⁾ Langdorf S.A., THEORY OF ALTERNATING CURRENT MACHINERY, Mc. Graw Hill, New-Delhi, 1974, hal 487

Tetapi dari persamaan 2.7,

$$\frac{\omega_m}{-(2/p)\omega_s} = 1 - s_f \quad (2.10)$$

Jadi,

$$s_b = 2 - s_f \quad (2.11)$$

Arus rotor yang diinduksikan oleh gelombang fluksi mundur mempunyai slip frekwensi $(2 - s_f)\omega_s$. Arus rotor ini menghasilkan medan putar pada arah mundur terhadap rotor dengan kecepatan $(2 - s_f)(-2/p)\omega_s$ terhadap stator. Cabang rangkaian yang mengalirkan arus I_{sb} mempunyai impedansi,

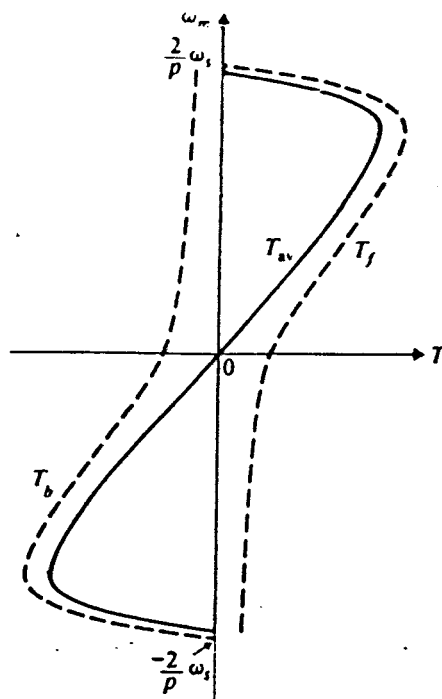
$$Z_b = \frac{(jX_m/2) \{[(R_z'/2(2 - s) + j(X_z'/2))]\}}{(R_z'/2(2 - s) + j[(X_m + X_z')/2])} \quad (2.12)$$

dan ini ditunjukkan dalam paralel dengan $jX_m/2$ dalam gambar 2.4. Pada kecepatan normal impedansi yang ditimbulkan oleh I_s oleh "f" rangkaian paralel dalam gambar 2.4, dimana $R_z'/2s_f$ adalah besar , dimana lebih besar dari yang ditimbulkan oleh rangkian paralel "b", dimana $R_z'/2(2-s_f)$ adalah kecil . Jadi $E_{1f} > E_{1b}$. Ini berarti bahwa bila kecepatan motor bertambah, maka gelombang fluksi maju juga bertambah, sedangkan gelombang mundur berkurang . Namun pada semua kecepatan

$$E_{1f} + E_{1b} = V_1 \quad \text{Volt} \quad (2.13)$$

Jadi dengan rotor berputar, kopel karena fluksi yang berputar maju bertambah melebihi pada keadaan diam, sedangkan kopel karena gelombang mundur berkurang . Dalam

term dari karakteristik motor induksi 3 fasa, driving torque bertambah, dan plugging torque berkurang. Kedua kurva kecepatan-kopel, yang bila dikombinasikan memberikan kurva kecepatan-kopel resultante dari motor satu fasa, digambarkan dalam gambar 2.5.



GAMBAR 2.5⁵⁾
KURVA KECEPATAN-TORSI MOTOR INDUKSI SATU FASA

Dari keterangan diatas maka kopel untuk motor satu fasa yang diperlihatkan dalam kurva merupakan harga rata-rata dari kopel yang dihasilkan oleh kopel yang berpulsasi, karena daya sesaat dalam rangkaian satu fasa

⁵⁾ Stemon G.R, Straughen A, **ELECTRIC MACHINES**, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1980, hal 438

adalah berpululasi . Bila harga rata-rata dari daya adalah P , maka

$$P = T_{av} \omega_m \quad \text{Watt} \quad (2.14)$$

Kopel elektromekanik yang dihasilkan oleh motor sama dengan daya yang didedipasikan dalam tahanan fiktif rangkaian R_2'/s dibagi dengan kecepatan dari motor. Prinsip ini dapat juga dalam kedua bagian dari rangkaian ekivalen dari gambar 2.4 untuk menentukan kopel netto dari motor induksi satu fasa. Bila rangkaian dalam gambar 2.4 dipecah untuk suatu harga V_1 dan ω_m , maka kopel maju (forward) dan mundur (backward) adalah

$$T_f = \frac{\rho}{2} \frac{1}{\omega_s} (I'_{af})^2 \frac{R_2'}{2s_f} \quad \text{N.m.} \quad (2.15)$$

$$T_b = \frac{\rho}{2} \frac{1}{\omega_s} (I'_{ab})^2 \frac{R_2'}{2s_b} \quad \text{N.m.} \quad (2.16)$$

dan kopel elektromagnetis rata-rata dari motor satu fasa adalah :

$$T_{av} = T_f + T_b \quad \text{N.m.} \quad (2.17)$$

Bila motor dalam keadaan stationer (diam) dan $s = 1$, maka $I'_{af} = I'_{ab}$ dan $T_{av} = 0$, sehingga suatu kumparan tunggal dalam stator tidak menghasilkan kopel mula . Kopel mula ini dapat dihasilkan oleh kumparan stator kedua (kumparan bantu).

2.1.2 Menentukan Parameter Dari Rangkaian Ekuivalen

Untuk menentukan parameter-parameter dari rangkaian ekuivalen dalam gambar 2.4, beberapa test dilakukan pada kumparan stator utama dari motor induksi satu fasa, yaitu *no-load test* dan *locked test*.

No-Load test dilakukan pada waktu motor dalam keadaan berjalan tanpa beban, pada rating tegangan dan frekuensi seperti yang tertulis pada plat nama motor. Pada keadaan tanpa beban motor mengalami slip yang kecil, tahanan $0.5R_z/s$ menjadi sangat besar, sedangkan tahanan $0.5R_z/(2-s)$ yang merupakan komponen arah putaran mundur menjadi cukup kecil sehingga arus magnetisasi dapat diabaikan. Gambar 2.9 merupakan rangkaian no-load dan locked test pada motor, dan total dari reaktansinya

$$X_o = X_1 + 0.5X_m + 0.5X_z \quad (2.18)$$

Untuk locked test pada motor induksi satu fasa, arus magnetisasi diabaikan, dan motor dalam keadaan ditahan sehingga $s=1$, dan $X_1=X_z$,

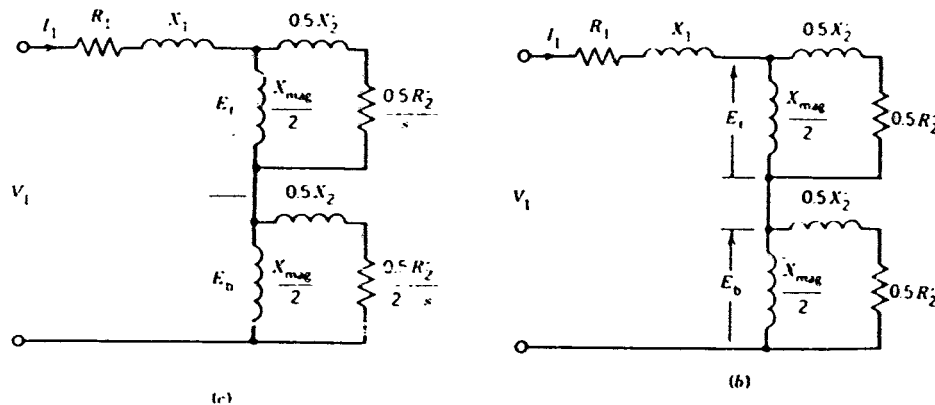
$$X_1 = X_z' = X_L/2 \quad (2.19)$$

dimana X_L adalah reaktansi locked test.

Reaktansi magnetik dapat ditentukan dari persamaan 2.18 dan 2.19,

$$X_m = 2X_o - 1.5X_L \quad (2.20)$$

Tahanan R_1 dari belitan utama diukur dengan DC.



GAMBAR 2.6⁵⁾
RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI SATU FASA
 (a) No-load test , (b) Locked rotor test

Tahanan rotor R_2 dihitung seperti pada motor induksi fasa banyak. Tahanan seri ekivalen pada motor saat locked test,

$$R_L = P_L / I_L^2 \quad (2.21)$$

P_L dan I_L adalah daya dan arus input motor, pada waktu motor ditahan putarannya sehingga diam (locked) maka akan didapatkan R_2 dengan menggunakan persamaan :

$$R_2 = (R_L - R_1) \left(\frac{X_2 + X_M}{X_M} \right)^2 \quad (2.22)$$

Rugi putaran dapat diperoleh dengan mengurangi rugi-rugi tembaga pada stator dan rotor dari daya input pada waktu tanpa beban dan mengabaikan arus magnetik arah lawan dan rugi-rugi tembaga ini adalah,

⁵⁾ Leander W. Matsch, ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL MACHINES, IEP A Dun Dumelly Publisher, New York, 1977, hal 454 - 456

$$\begin{aligned}
 P_c &= I_o^2 [R_A + 0.5(R_L - R_A)] \\
 &= 0.5 I_o^2 (R_A + R_L)
 \end{aligned}
 \quad (2.23)$$

dan rugi-rugi putaran,

$$P_{rot} = P_o - P_c \quad (2.24)$$

2.1.3 Torsi Starting Motor Induksi Satu Fasa

Pada gambar 2.7(a) ditunjukkan keadaan motor induksi pada kondisi start. Arus melalui belitan utama dan belitan bantu yaitu I_m dan I_a sedang rotor sangkarnya diasumsikan sebagai rotor yang mempunyai belitan dengan dua fasa yaitu belitan α - b dan c - d . Misalkan belitan mempunyai N_2 lilit dan frekuensi f pada statornya. Arus yang mengalir pada belitan utama menghasilkan fluks yang menginduksikan tegangan e_{2m} dan arus i_{2m} pada belitan rotor α - b . Arus i_{2m} berlawanan arah dengan fluks ϕ_m . Sedang fluks ϕ_a menginduksikan tegangan e_{2a} dan arus i_{2a} pada belitan rotor c - d .

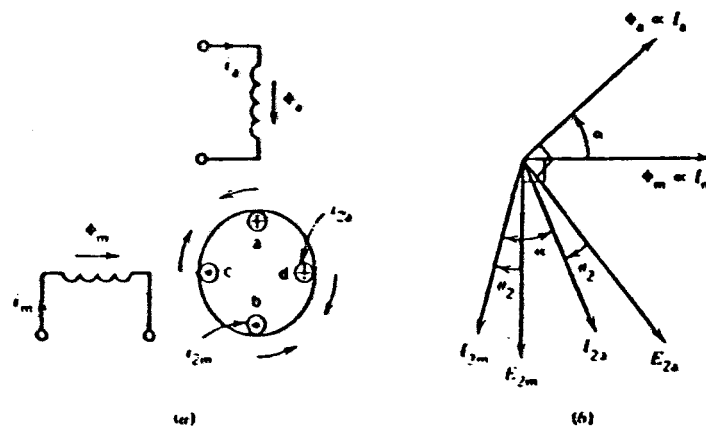
$$E_{2m} = 4.44fN_2\phi_m \quad (2.25)$$

$$E_{2a} = 4.44fN_2\phi_a \quad (2.26)$$

Arus i_{2m} lagging terhadap tegangan e_{2m} dan i_{2a} lagging terhadap tegangan e_{2a} dengan sudut θ_2 , dimana,

$$\cos \theta_2 = \frac{R_2}{(R_2^2 + X_2^2)^{1/2}} = \frac{R_2}{Z_2} \quad (2.27)$$

Diagram phasor untuk fluksi, arus dan tegangan ditunjukkan pada gambar 2.7(b). Torsi yang dihasilkan karena



GAMBAR 2.7⁷⁾
MOTOR INDUKSI SATU FASA SAAT STARTING

interaksi dari ϕ_m dan I_{2a} dan bergerak searah jarum jam sedang ϕ_a dan I_{2m} menghasilkan torsi lawannya. Sehingga torsi yang dihasilkan sama dengan nol.

Torsi yang dihasilkan oleh ϕ_m dan I_{2a} ,

$$\begin{aligned} T_m &\propto \phi_m I_{2a} \cos \angle \phi_m, I_{2a} \\ &\propto \phi_m I_{2a} \cos (90 + \theta_2 - \alpha) \end{aligned}$$

Torsi yang dihasilkan oleh ϕ_a dan I_{2m} ,

$$\begin{aligned} T_a &\propto \phi_a I_{2m} \cos \angle \phi_a, I_{2m} \\ &\propto \phi_a I_{2m} \cos (90 + \theta_2 + \alpha) \end{aligned}$$

Total torsi starting,

$$T_s \propto \{ \phi_m I_{2a} \cos (90 + \theta_2 - \alpha) - \phi_a I_{2m} \cos (90 + \theta_2 + \alpha) \}$$

tetapi

$$\frac{\phi_m}{\phi_a} = \frac{E_{2m}}{E_{2a}} = \frac{I_{2m}}{I_{2a}}$$

⁷⁾ PC.Sen, PRINCIPLES OF ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS, John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 1989, hal 400

atau

$$\phi_m I_{2a} = \phi_a I_{2m}$$

Sehingga,

$$T_s \propto I_{2m} \phi_a \sin \alpha \cos \theta_2 \quad (2.28)$$

dari persamaan 2.26,

$$\phi_a = \frac{E_{2a}}{4.44fN_2} = \frac{I_{2a}Z_2}{4.44fN_2} \quad (2.29)$$

Dari persamaan 2.28, 2.29 dan 2.27,

$$T_s \propto \frac{I_{2m} I_{2a} R_2 \sin \alpha}{4.44fN_2}$$

I_{2m} sama dengan I_m dan I_{2a} sama dengan I_a sehingga,

$$T_s \propto I_m I_a \sin \alpha, \quad (2.30)$$

$$T_s \propto K I_m I_a \sin \alpha \quad (2.31)$$

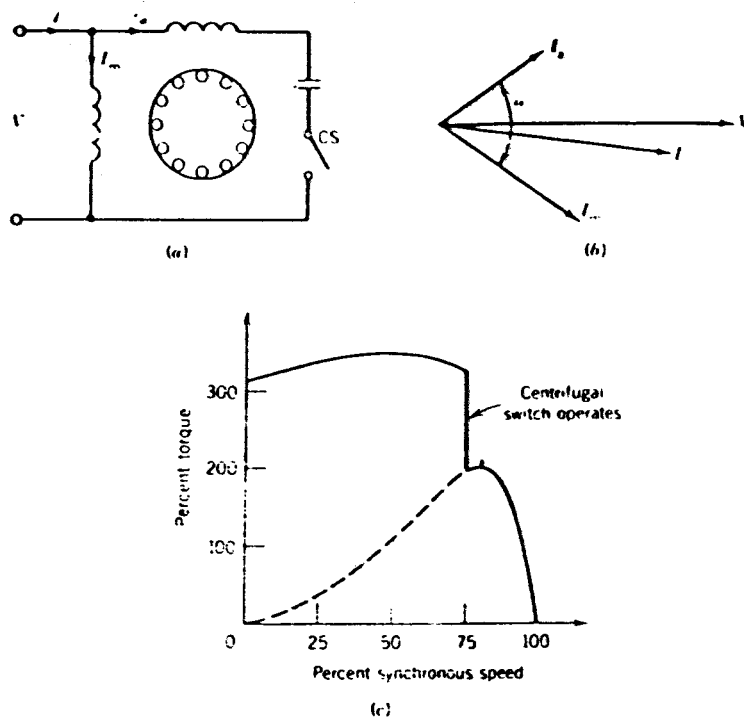
Dari persamaan diatas bahwa besarnya torsi start tergantung dari besarnya arus pada belitan utama dan belitan bantu dan perbedaan fasa arus keduanya.

2.2 MOTOR INDUKSI SATU FASA STARTING KAPASITOR

Pada motor induksi satu fasa yang menggunakan kapasitor sebagai starting mempunyai belitan bantu (auxiliary winding) yang terhubung seri dengan kapasitor, belitan bantu terletak 90° dari belitan utama. Kapasitor dan belitan bantu bekerja hanya selama pada waktu start dan kemudian akan terbuka kembali dari rangkaian oleh sentrifugal switch. Sentrifugal switch ini terbuka pada

waktu motor mencapai kecepatan 75 - 80% dari kecepatan sinkron.

Motor kapasitor atau motor induksi satu fasa dengan kapasitor starting yang dirangkai seri dengan belitan bantu seperti yang terlihat pada gambar 2.8(a).



GAMBAR 2.8⁸⁾
MOTOR INDUKSI SATU FASA STARTING KAPASITOR

Dengan adanya kapasitor ini menyebabkan kenaikan sudut fasa pada arus belitan sehingga dihasilkan torsi yang tinggi pada waktu start, hal ini dapat dilihat pada gambar 2.8(b). karakteristik dari motor induksi satu fasa starting kapasitor.

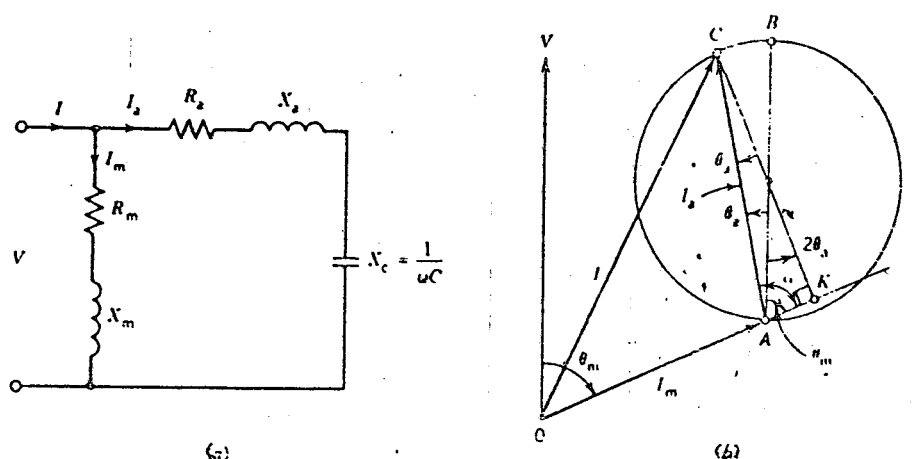
Untuk kondisi starting, kapasitor start motor dapat digambarkan oleh rangkaian seperti pada gambar 2.9.

⁸⁾ Ibid. hal. 395

Phasor diagram untuk kondisi diam terlihat pada gambar 2.9(b). Arus pada belitan utama $I_m = OA$ tertinggal dari V dengan sudut θ_m . Arus pada kumparan bantu $I_a = AC$ mendahului V dengan sudut θ_a . Arus starting $I = I_a + I_m = OC$, jika X_c tinggi sekali, I_a sama dengan nol dan $I = I_m = OA$, jika $X_c = X_a$ adalah maksimum maka sama dengan pula $|V|/R_a$ dan satu fasa dengan supply tegangan V yang digambarkan dengan garis vertikal AB dalam gambar 2.9(b).

Pada saat I_m konstan,

$$T_e \propto I_a \sin \alpha \propto \text{panjang } CK$$



GAMBAR 2.9⁹⁾
RANGKAIAN MOTOR INDUKSI SATU FASA STARTING KAPASITOR
PADA SAAT STARTING

Panjang CK maksimum jika melewati titik pusat lingkaran, pada pasor diagram digambarkan kondisi maksimum dari torsi starting.

$$\theta_a = (90^\circ - \theta_m)/2$$

⁹⁾ Ibid. hal. 403

$$\begin{aligned}
 \tan \theta_a &= \left[\frac{1 - \cos 2\theta_a}{1 + \cos 2\theta_a} \right]^{1/2} = \left[\frac{1 - \sin \theta_a}{1 + \sin \theta_a} \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{1 - (X_m/|Z_m|)}{1 + (X_m/|Z_m|)} \right]^{1/2} = \left[\frac{|Z_m| - X_m}{|Z_m| + X_m} \right]^{1/2} \\
 &= \frac{R_m}{|Z_m| + X_m} \quad (2.32)
 \end{aligned}$$

dan,

$$\tan \theta_a = \frac{X_c - X_a}{R_a} \quad (2.33)$$

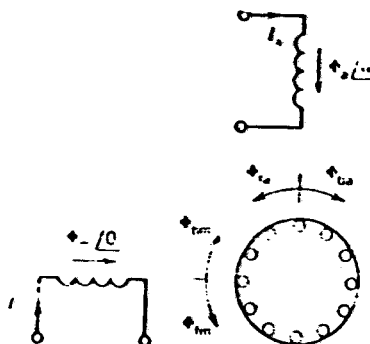
dari kedua persamaan tersebut maka,

$$\begin{aligned}
 \frac{R_m}{|Z_m| + X_m} &= \frac{X_c - X_a}{R_a} \\
 X_c = \frac{1}{\omega C} &= X_a + \frac{R_a R_m}{|Z_m| + X_m} \\
 C &= \frac{1}{\omega \left[X_a + \frac{R_a R_m}{|Z_m| + X_m} \right]} \quad (2.34)
 \end{aligned}$$

Dari persamaan untuk harga C yang memungkinkan torsi starting maksimum.

2.2.1 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Starting Kapasitor

Pada waktu belitan utama dan belitan bantu di aliri arus i_m dan i_a , belitan utama menghasilkan fluks putar ϕ_{fm} (arah maju) dan ϕ_{fb} (arah mundur) sedang belitan bantu menghasilkan ϕ_{fa} dan ϕ_{fb} , sehingga mendapatkan empat buah fluks putar (lihat gambar 2.10).

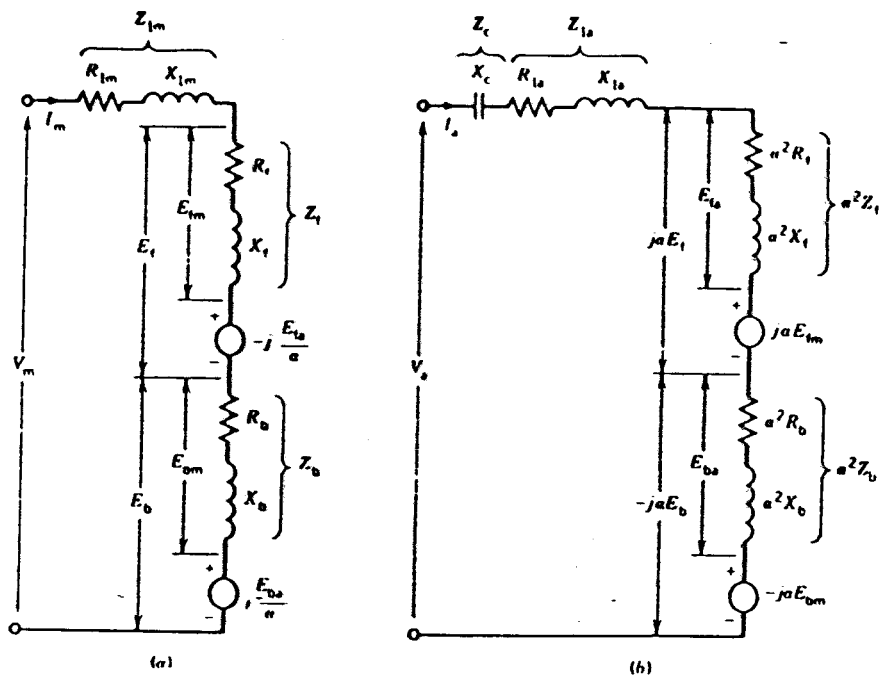


GAMBAR 2. 10¹⁰⁾
MEDAN PUTAR PADA WAKTU MOTOR KAPASITOR STARTING

Rangkaian ekivalen untuk belitan utama terlihat pada gambar 2.11(a), dimana E_{fm} dan E_{bm} adalah tegangan induksi dari fluks ϕ_{fm} dan ϕ_{bm} . Tegangan induksi, $-jE_{fa}/\alpha$ dan $-jE_{ba}/\alpha$ ($\alpha = N_a/N_m$), dalam belitan utama yang disebabkan fluks ϕ_{fa} dan ϕ_{fb} dari tegangan pada belitan bantu adalah tegangan internal.

Fluks putar arah maju ϕ_{fa} dari belitan bantu menginduksi tegangan dalam belitan bantu. Dari gambar 2.12 fluks ϕ_{fa} menginduksi tegangan dalam belitan utama saat $\pi/2$ radian selanjutnya. Jika α adalah perbandingan belitan bantu dan belitan utama, tegangan induksi $-jE_{fa}/\alpha$, dimana $-j$ adalah fasa tertinggal $\pi/2$ radian. Fluks ϕ_{ba} akan menginduksikan tegangan E_{ba} dalam belitan bantudan tegangan $j E_{ba}/\alpha$ dalam belitan utama saat $\pi/2$ radian selanjutnya.

¹⁰⁾ Ibid. hal. 440



11)
GAMBAR 2.11
RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI SATU FASA
KAPASITOR STARTING, $a=N_a/N_m$

Rangkaian ekivalen belitan bantu ditunjukkan pada gambar 2.11(b), dimana tegangan internal jaE_{1m} dan $-jaE_{2m}$ adalah tegangan induksi pada belitan bantu yang disebabkan fluks putar ϕ_{1m} dan ϕ_{2m} dari belitan utama.

Dari persamaan tegangan dan arus pada dua belitan :

$$V_m = I_m(Z_{1m} + Z_1 + Z_2) - jE_{2m}a/a + jE_{1m}a/a \quad (2.35)$$

$$V_a = I_a[Z_c + Z_{1a} + a^2(Z_1 + Z_2)] + jaE_{1m} - jaE_{2m} \quad (2.36)$$

$$V_m = V_a \quad (2.37)$$

$$I_s = I_m + I_a \quad (2.38)$$

11) Ibid. hal. 411

dimana $Z_{1m} = R_{1m} + X_{1m}$ adalah impedansi gandeng dari belitan utama.

$Z_{1a} = R_{1a} + X_{1a}$ adalah impedansi gandeng dari belitan bantu.

$Z_c = -j X_c$ adalah impedansi yang terhubung seri dengan belitan bantu.

Maka,

$$E_{fa} = I_{aa}^2 Z_f \quad (2.39)$$

$$E_{ba} = I_{aa}^2 Z_b \quad (2.40)$$

$$E_{fm} = I_m Z_f \quad (2.41)$$

$$E_{bm} = I_m Z_b \quad (2.42)$$

Dari persamaan (2.39) sampai (2.42) dan persamaan (2.35) dan (2.36),

$$V_m = I_m (Z_{1m} + Z_f + Z_b) - j a (Z_f - Z_b) I_a \quad (2.43)$$

$$V_a = j a (Z_f - Z_b) I_m + [Z_c + Z_{1a} + a^2 (Z_f + Z_b)] I_a \quad (2.44)$$

Penyelesaian persamaan (2.43) dan (2.44) akan didapatkan arus I_m dan I_a .

2.2.2 Torsi Starting Motor Kapasitor

Torsi yang dihasilkan oleh motor adalah

$$T = T_f - T_b = (P_{gf} - P_{gb}) / \omega_{syn}$$

dari gambar 2.11,

$$P_{gf} = \text{Re}(E_f I_m^* + j a E_f I_a^*)$$

$$P_{gb} = \text{Re}(E_b I_m^* - j a E_b I_a^*)$$

$$P_{gf} - P_{gb} = \text{Re}[(E_f - E_b) I_m^* - j a (E_b + E_f) I_a^*] \quad (2.45)$$

Penyelesaian persamaan diatas lebih disederhanakan menjadi,

$$(P_{gf} - P_{gb}) = (|I_m|^2 + |aI_a|^2)(R_f - R_b) + 2a|I_a||I_m|(R_f + R_b)\sin(\theta_a - \theta_m) \quad (2.46)$$

dimana $I_m = |I_m| \angle \theta_m$

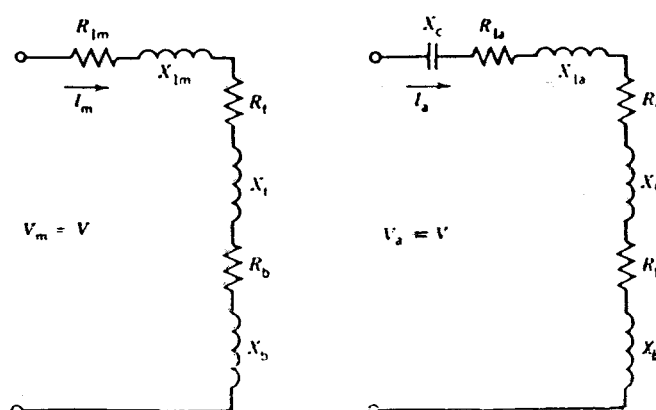
$I_a = |I_a| \angle \theta_a$

Untuk starting, slip $s = 1$ dan $R_f = R_b$. Dari persamaan diatas didapatkan torsi starting,

$$T_o = \frac{2a|I_a||I_m|(R_f + R_b)}{\omega_{syn}} \sin(\theta_a + \theta_m) \quad (2.47)$$

$$= K I_a I_m \sin \alpha$$

Gambar 2.12 menunjukkan rangkaian ekivalen saat motor start.



GAMBAR 2.12 ¹²⁾
RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI KAPASITOR STARTING
SAAT START

¹²⁾ Ibid. hal. 414

$$V_m = V \text{ dan } V_a = V$$

dan

$$I_m = \frac{V}{Z_{1m} + Z_f + Z_b} \quad (2.48)$$

$$I_a = \frac{V}{Z_{1a} - jX_c + a^2(Z_f + Z_b)} \quad (2.49)$$

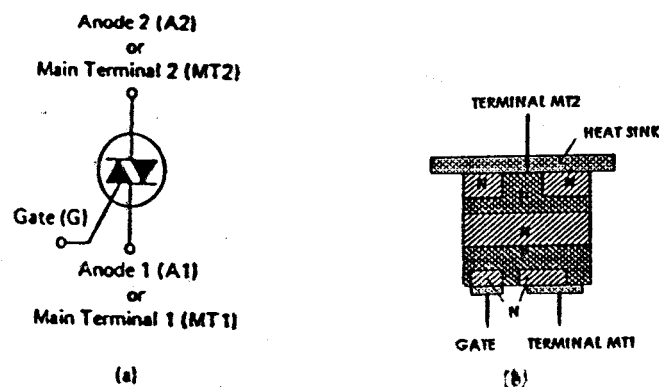
$$I_s = I_m + I_a \quad (2.50)$$

BAB III

T R I A C

Triac adalah thyristor dua arah (bidirectional thyristor) dengan tiga terminal atau sering juga disebut bidirectional switch dalam satu chip tunggal, yang mempunyai kemampuan untuk menyalurkan arus dalam dua arah, dan dapat dinyalakan oleh arus gate dalam arah menuju atau keluar dari terminal gate untuk masing-masing arah arus. Simbol untuk triac terlihat pada gambar 3.1(a). Dalam gambar terlihat bahwa MT_1 menunjukkan terminal utama 1 (Main Terminal) dan MT_2 menunjukkan terminal utama 2.

Struktur dasar dari triac ditunjukkan pada gambar 3.1(b). Daerah diantara terminal MT_1 dan terminal MT_2 adalah p-n-p-n yang paralel dengan n-p-n-p.

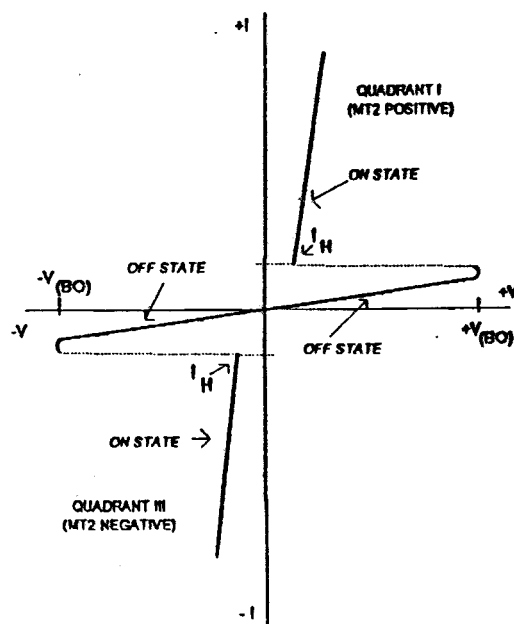


GAMBAR 3.1¹⁾
 (a) SIMBOL DAN TERMINAL TRIAC
 (b) STRUKTUR DASAR TRIAC

¹⁾ -----, SCR MANUAL, Six Edition, General Electric, 1979, hal. 102

3.1 KARAKTERISTIK TRIAC

Karakteristik tegangan - arus AC dari triac ditunjukkan pada gambar 3.2 dengan terminal MT_1 sebagai titik referensi. Kuadran I, adalah daerah dimana MT_2 positif dibandingkan dengan MT_1 dan demikian sebaliknya untuk kuadran III. Tegangan *breakover*, $V_{(BO)}$ pada kuadran tersebut (tanpa sinyal gerbang) harus lebih tinggi dibandingkan puncak gelombang AC normal yang diberikan untuk mempertahankan kontrol dari gerbang. Arus gerbang dengan besar yang ditentukan dengan salah satu polaritas akan menyalakan triac untuk konduksi dalam salah satu kuadran, dengan pemberian tegangan kurang dari $V_{(BO)}$.



GAMBAR 9.2²⁾
KARAKTERISTIK TEGANGAN-ARUS AC TRIAC

²⁾ Ibid. hal. 189

Bila V_{BO} dilampaui, bahkan dalam keadaan transien, triac akan mengalami konduksi dan terus menerus konduksi sampai arus jatuh dibawah arus *holding*, I_H .

Karakteristik lainnya untuk triac adalah arus rata-rata maksimum yang diperbolehkan melewati main terminal, $I_{T(RMS)}$ dan Tegangan breakover, V_{DROM} adalah tegangan maksimum supply yang dikenakan pada main terminalnya (MT1-MT2). Apabila tegangan pada main terminal melebihi V_{DROM} maka kontrol gate akan terlepas dan triac ON terus, tetapi tidak menyebabkan triac rusak. Umumnya rating tegangan V_{DROM} adalah 100, 200, 400, dan 600 V. Sedangkan arus rata-rata maksimum, $I_{T(RMS)}$ triac umumnya yaitu 1, 3, 6, 10 15, 20, 30, 40, 60, dan 80 Ampere.

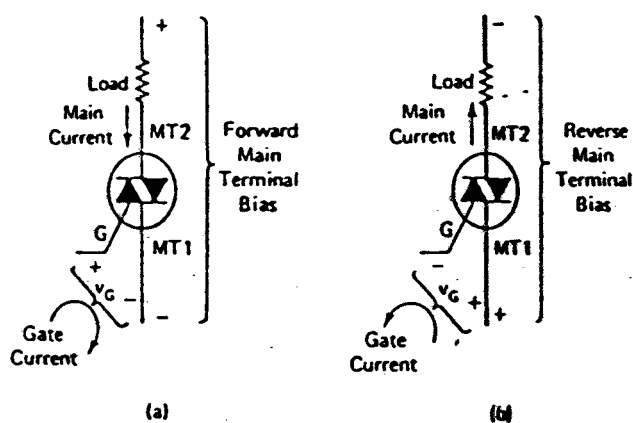
Karakteristik dari triac yang perlu diperhatikan juga yaitu drop tegangan pada terminal pada waktu triac ON, V_{TM} . Idealnya drop tegangan pada waktu triac ON adalah 0 V tetapi kenyataannya mempunyai tegangan 1-2 V, hal ini dikarenakan triac berfungsi seperti switch mekanik yang melewatkan tegangan dan arus beban sehingga ada sebagian kecil daya yang didisipasikan sebagai panas oleh triac.

3.2 PENYALAHAN (TRIGGERING)

Pada saat triac diberikan tegangan lebih positif pada main terminal MT2 maka triggering dilakukan dari arus yang mengalir dari gate ke main terminal MT1, Polaritas tegangan dan arah arus dalam hal ini ditunjukkan pada gambar 3.3(a). Terminal G yaitu gate lebih positif dari

MT1 dan arus trigger yang mengalir pada triac dari gate melalui main terminal MT1. Tegangan pada gate yaitu V_G dan arus pada gate yaitu I_G . Pada triac berukuran sedang mempunyai tegangan V_G antara 0.6-2.0 V dan arus I_G antara 0.1-20 mA.

Pada saat triac dikenakan tegangan yang lebih positif pada MT1 (reverse main terminal bias), triggering dilakukan dengan memberikan arus yang mengalir dari MT1 kemudian masuk ke terminal G (gate), arah arus ini ditunjukkan pada gambar 3.3(b), tegangan pada gate lebih negatif terhadap MT1.



GAMBAR 3.3³⁾

- (a) ARAH ALIRAN ARUS GATE DAN BEBAN PADA TRIAC DIBIAS MAJU
(b) ARAH ALIRAN ARUS GATE DAN BEBAN PADA TRIAC DIBIAS TERBALIK

Triac tidak memerlukan arus gate yang terus menerus tetapi hanya sekali sebagai triggering. Keadaan triac ON

³⁾ Timothy, J.M., INDUSTRIAL SOLID-STATE ELECTRONICS, second edition, Prentice Hall, Inc., 1986, hal 180

dapat berubah jika polaritas tegangan pada terminalnya berubah atau jika arus pada main terminalnya drop dibawah arus holding I_{HO} , biasanya arus rating I_{HO} kurang dari 100mA.

Triac dapat dinyalakan dengan energi yang rendah dengan arus gerbang positif maupun negatif dalam kedua kuadran I dan III. Penyalaan triac dapat diperoleh melalui DC, AC yang disearahkan, atau sumber pulsa seperti transistor unijunction, lampu neon, dan dioda seperti ST-2 diac, SBS (Silicon Bilateral Switch) atau Asymetrical Trigger Switch (ST-4).

Macam penyalaan untuk triac adalah sebagai berikut:

MT_2+ , Gate +, I +; Kuadran pertama, arus dan tegangan gerbang positif.

MT_2+ , Gate -, I -; Kuadran pertama, arus dan tegangan gerbang negatif.

MT_2+ , Gate +, III + ; Kuadran ketiga, arus dan tegangan gerbang positif.

MT_2+ , Gate -, III - ; Kuadran ketiga, arus dan tegangan gerbang negatif.

3.3 PEMADAMAN (TURN-OFF)

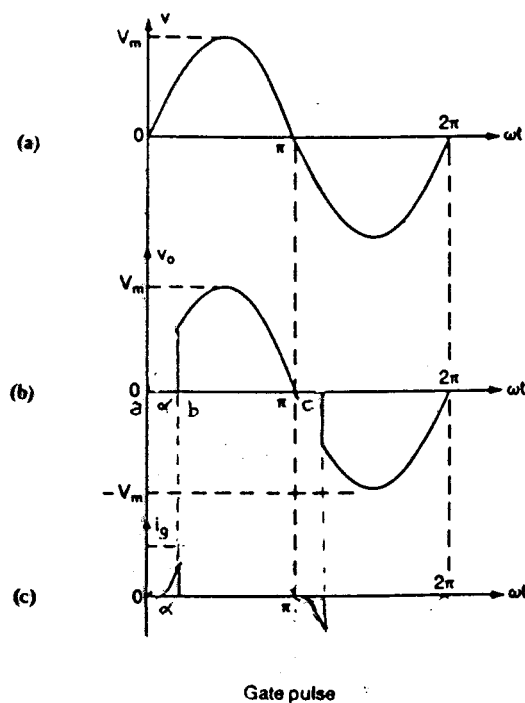
Pemadaman triac terjadi secara otomatis ketika arus triac melalui harga nol pada saat arus beban mulai membalik. Untuk beban induktif harga arus nol menjadi lebih lambat dibandingkan dengan harga nol dari sumber tegangan. Pada saat arus menjadi nol, triac dalam keadaan

blocking dalam arah yang berlawanan.

3.4 KONTROL SUDUT FASA

Untuk mengatur besarnya daya pada beban dapat dilakukan penyalan sudut fasa. Untuk triac dapat diatur penyalan untuk setiap paruh gelombang (*half wave*) sehingga diperoleh penyalan gelombang penuh (*full wave triggering*).

Kontrol sudut fasa pada triac ditunjukkan pada gambar 3.4. Antara waktu α dan b , kondisi triac *off*,



GAMBAR 3.4⁴⁾

PENYALAN TRIAC : (A) TEGANGAN SUMBER ; (B) TEGANGAN BEBAN YANG DIATUR SUDUT KONDUKSINYA ; (C) SINYAL GERBANG

⁴⁾ Muhammad Harunur Rashid, POWER ELECTRONICS, CIRCUITS, DEVICES, AND APPLICATIONS, Prentice-Hall International, Inc., 1988, hal 142.

sehingga tidak ada tegangan yang melalui beban. Pada saat waktu b dengan sudut α , triac dinyalakan dengan pulsa positif, mengalirkan tegangan gelombang penuh ke beban. Triac mengalami konduksi dan terus menghantarkan tegangan meskipun pulsa trigger pada gate dihentikan. Waktu antara b dan c (diukur dalam derajat) disebut sudut konduksi. Pada waktu c tegangan dan arus jatuh ke nol dan memasuki polaritas berlawanan. Arus turun dibawah I_H sehingga triac kondisi *off*.

Tegangan rms yang diperoleh dengan sudut penyalan α adalah (V_o adalah tegangan jala-jala) :

$$V_o = V_s \left[\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right] \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

Dengan variasi α antara 0 sampai π , tegangan V_o dapat bervariasi dari V_s sampai 0.

3.5 PEMBATAHAN ARUS DAN TEGANGAN KRITIS

Triac dapat juga diasumsikan dua buah thyristor (SCR). Pembatasan arus dan tegangan kritis terhadap triac dengan menganalisa salah satu komponen thyristornya.

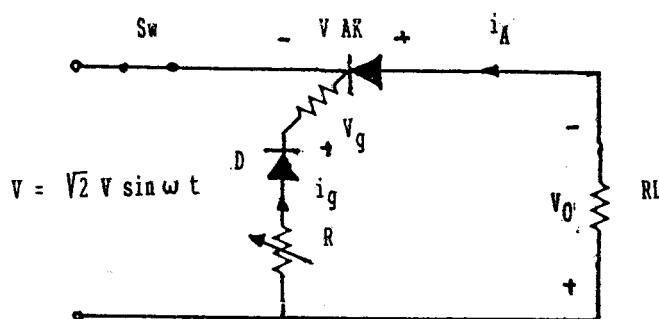
3.5.1 Pembatasan di/dt

Bila thyristor yang telah terhubung dengan sumber mulai konduksi maka daerah konduksi merambat begitu cepat. Tetapi bila di/dt yang merupakan karakteristiknya terlampau besar, maka hot spot akan terbentuk disekitar gate junction. Sehingga terjadilah pemanasan ditempat

tersebut yang menyebabkan kerusakan pada thyristor.

Untuk menghindari hal tersebut maka di/dt harus dibatasi pada suatu harga tertentu yang tidak melebihi dari data spesifikasinya sehingga tidak membahayakan sampai merusakkan triac. Pembatasan di/dt dilakukan dengan memasang induktansi kecil dalam rangkaian anodanya.

Untuk dapat menyalakan thyristor, maka arus yang diumpankan pada gate harus melebihi arus gate minimum pada karakteristik triac dan pada saat yang sama arus gate tidak boleh melebihi harga yang diijinkan (I_{gm}). Pada gambar 3.5. adalah rangkaian penyearahan thyristor, beban adalah tahanan R_L dan tegangan V_o dapat dikontrol oleh R_c .



GAMBAR 3.5.
RANGKAIAN PENYEARAHAN SETENGAH GELOMBANG TERKONTROL

Sudut delay α didefinisikan sebagai interval dalam sudut listrik dimana saat permukaan dari konduksi di delay dengan pengaturan phasa. Secara teoritis arus delay bisa mengalir pada $\omega t = \pi$ sehingga untuk R_{cmax} maka $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

Bila thyristor konduksi :

$$-V = R_L i_A + L \frac{di_A}{dt} \quad (3.2)$$

t' adalah waktu yang telah lewat penyalaan dan tanda negatif muncul karena thyristor conduct hanya selama setengah cycle negative yang pertama. Solusi dari persamaan diatas,

$$i_A = - \frac{V}{R_L} (1 - e^{-t'/\tau}) \quad (3.3)$$

dengan,

$$\tau = \frac{L}{R_L} \quad (3.4)$$

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{V}{\tau R_L} e^{-t'/\tau} \quad (3.5)$$

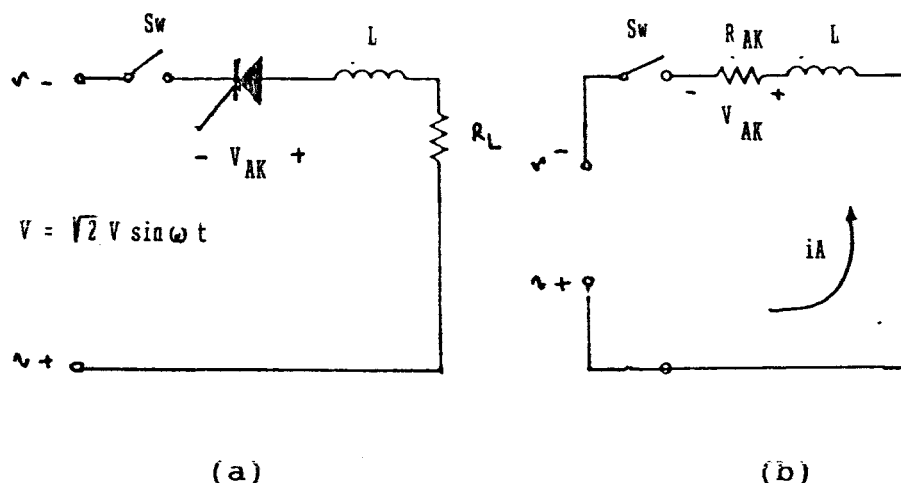
Harga maksimum dari $\frac{di_A}{dt}$ terjadi bila $\delta = 90^\circ$ yakni bila sumber negatif maksimum dipakai pada rangkaian pada $t' = 0$,

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{\sqrt{2} V}{L} \quad (3.6)$$

3.5.2. Pembatasan dv/dt

Bila harga dv/dt terlalu tinggi menyebabkan thyristor konduksi walaupun arus pada gate nol. Bila thyristor dalam gambar 3.6. belum terjadi konduksi, maka dia dapat dinyatakan sebagai tahanan R_{AK} yang sangat besar dibandingkan dengan tahanan beban R_L yang bisa diabaikan. Tahanan R_{AK} tidak dinyatakan dalam data sheet, tetapi dapat dihitung dari arus bocor yang besarnya $\approx 15 \text{ mA}$ pada

saat thyristor belum konduksi.



GAMBAR 3.6
RANGKAIAN THYRISTOR DAN BEBAN TANPA SNUBBER CIRCUIT

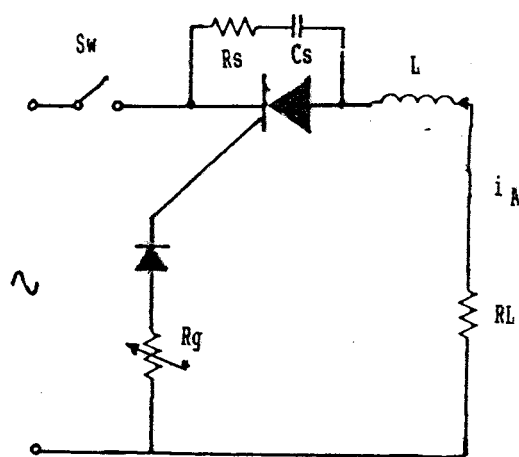
Harga dv_{AK}/dt dapat dikurangi dengan menaikkan harga induktansi L , namun penambahan tersebut tidak melebihi 40mH, karena terlalu mahal. Untuk mengatasi hal ini dipakai rangkaian *snubber circuit*.

Snubber circuit adalah merupakan suatu rangkaian seri tahanan dan kapasitor (R_s dan C_s) yang dihubungkan pada anoda dan katoda seperti yang terlihat pada gambar 3.7.

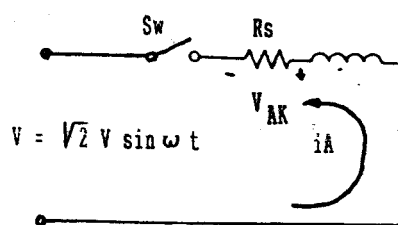
Karena tegangan pada kapasitor C_s yang masih nol sebelum penyalaan, dan tegangannya tidak dapat naik secara spontan, maka rangkaian ekivalen yang terlihat dari gambar 3.7(a) menjadi rangkaian seperti pada gambar 3.7(b). dengan R_L yang diabaikan. Sama dengan rangkaian pada gambar 3.6. maka :

$$\left. \frac{dv_{AK}}{dt} \right|_{\max} = \frac{R_s}{L} \sqrt{2} V \text{ volt}/\mu\text{sec} \quad (3.7)$$

Agar energi yang di disipasikan pada R_s tetap rendah, maka harganya dibuat lebih besar dari harga yang dibutuhkan untuk membatasi harga dv_{AK}/dt .



(a)



(b)

GAMBAR 3.7
RANGKAIAN THYRISTOR DENGAN SNUBBER CIRCUIT

Pada gambar 3.7 terlihat rangkaian dengan Snubber Circuit yang bekerjanya adalah sebagai berikut :

Selama setengah cycle negatif dari tegangan Snubber, kapasitor C_s diisi (charged) pada arah positif sampai waktu triac dinyalakan. Bila thyristor mulai konduksi, maka akan terjadi penambahan arus, karena muatan dalam kapasitor C_s dibuang (discharge) melalui rangkaian tahanan R_s . Hal ini berarti pada awal konduksi, di/dt sangat besar

sekali yang dapat melebihi harga di/dt yang diperbolehkan. Namun demikian bila rangkaian Snubber didesain dengan tepat, maka hal diatas tidak membahayakan triac.

Jadi untuk pemilihan parameter dalam rangkaian Snubber tergantung pada harga dalam:

- a. Penyediaan induktansi yang digunakan untuk membatasi dv/dt .
- b. Pengurangan/efisiensi rangkaian karena kerugian daya dalam Rs

BAB IV

ELEKTRONIK STARTING SWITCH MOTOR INDUKSI SATU FASA 1/2 HP STARTING KAPASITOR

4.1 PRINSIP KERJA MOTOR INDUKSI SATU FASA STARTING KAPASITOR

Kerja dari motor induksi satu fasa dengan kapasitor sebagai starting yaitu bila supply satu fasa dihubungkan dengan motor, kapasitor dan kumparan bantu masih terhubung oleh sentrifugal switch, arus yang mengalir pada motor adalah cukup besar untuk menggerakkan rotor yang membutuhkan kopel mula yang besar, dan kemudian rotor berputar semakin cepat. Setelah motor berputar 75% dari kecepatan sinkronnya maka sentrifugal switch melepaskan hubungan kapasitor dengan belitan utama karena kopel motor telah tercukupi oleh kumparan utama.

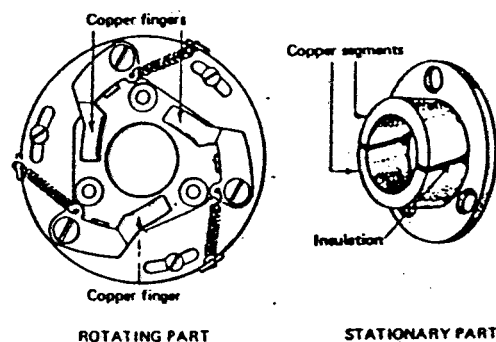
Motor induksi satu fasa dengan kapasitor starting pada saat akan mulai berputar arus yang melalui kontak setrifugal switch cukup besar dan dapat menimbulkan percikan bunga api pada waktu rangkaian kapasitor dan belitan bantu terlepas dari rangkaian utamanya.

Hal ini suatu saat dapat terjadi kegagalan start yang disebabkan oleh kontak sentrifugal switch telah rusak. Motor induksi satu fasa yang mengalami kegagalan start ini menarik arus yang sangat besar sehingga kumparan utama dapat terbakar. Untuk mengatasinya dipakai Triac sebagai

switching yang dapat meniadakan percikan bunga api dan dapat diatur penyalanya.

4.2 KONSTRUKSI SENTRIFUGAL SWITCH

Sentrifugal switch berupa switch mekanik yang berfungsi pada waktu berputar dengan rotor.



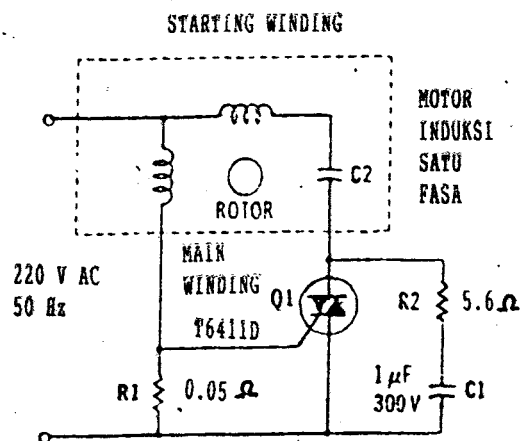
GAMBAR 4.1¹⁾
MEKANIK SENTRIFUGAL SWITCH

Gambar 4.1 menunjukkan konstruksi dari sentrifugal switch yang digunakan pada motor induksi satu fasa dengan kapasitor starting. Tampak bagian kontaktor yang selalu dilalui arus start yang besar.

4.3 RANGKAIAN ELEKTRONIK STARTING SWITCH

Untuk menggantikan fungsi dari sentrifugal switch dipakai rangkaian switching terkendali TRIAC adapun rangkaian lengkap terlihat pada gambar 4.2.

¹⁾ Rosenberg R., B.S., M.A., ELECTRIC MOTOR REPAIR, Rinehart Press, second edition, San Francisco, 1970, hal 54



GAMBAR 4.2
RANGKAIAN ELEKTRONIK STARTING SWITCH

Rangkaian ini bekerja hanya pada waktu terjadi starting sampai keadaan tegangan tidak dapat mentrigger TRIAC on.

4.3.1 Prinsip Kerja Rangkaian

Dari gambar 4.2. rangkaian starting motor induksi satu fasa 1/2 Hp secara otomatis yang dikendalikan via TRIAC. Gate dari triac terhubung dengan R1 sebagai sensor arus. Harga R1 ditentukan agar dapat diperoleh tegangan trigger untuk beban arus motor yang akan bekerja.

Pada waktu tegangan satu fasa terhubung pada motor sejumlah arus yang cukup besar mengalir pada kumparan utama dan memberikan pula drop tegangan pada R1 yang dipergunakan untuk mentrigger triac. Pada saat itu pula triac konduksi on sehingga kapasitor motor terhubung langsung dengan supply. Sehingga motor mempunyai kopel

mula yang sangat besar untuk menggerakkan rotor. Setelah rotor berputar, pada waktu kecepatan putarannya 75% dari kecepatan sinkron, arus yang mengalir pada motor menurun sehingga drop tegangan pada R1 tidak cukup mampu untuk terus mentrigger gate triac dan menjadi off. Pada keadaan ini kapasitor motor tidak lagi terhubung. Motor induksi satu fasa dalam keadaan running cukup hanya kumparan utama saja yang disupply karena kopel yang dihasilkan sudah dapat menjalankan rotor motor.

Rangkaian R2 dan C2 adalah rangkaian snubber yang berfungsi membatasi dv/dt serta di/dt pada triac agar tidak merusakkan triac. Kecepatan konduksi triac ditentukan oleh drop tegangan pada R1.

4.3.2 Analisa Rangkaian Motor Induksi Satu Fasa

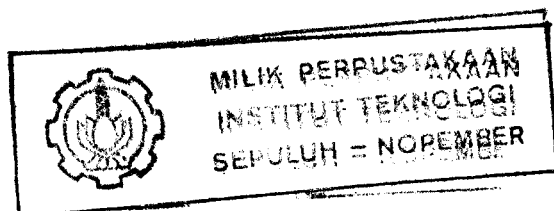
Gambar 4.3 menunjukkan pengetesan motor saat tanpa beban. Data-data motor pada waktu pengetesan sebagai berikut :

A. Test keadaan tanpa beban :

Daya	P_o :	192 Watt
Tegangan	V_o :	221 Volt
Arus	I_o :	4.02 Ampere
$\cos \theta$:	0.22
Frekuensi	:	50 Hz

B. Locked test :

Daya	P_L :	172 Watt
Tegangan	V_L :	63.6 Volt
Arus	I_L :	4.3 Ampere



$\cos \theta$: 0.63

Frekuensi : 50 Hz

C. Belitan bantu

Daya P_a : 93.6 Watt

Tegangan V_a : 29.1 Volt

Arus I_a : 4.01 Ampere

$\cos \theta$: 0.77

D. Kapasitor C_a : 300 μF / 110/125 VAC

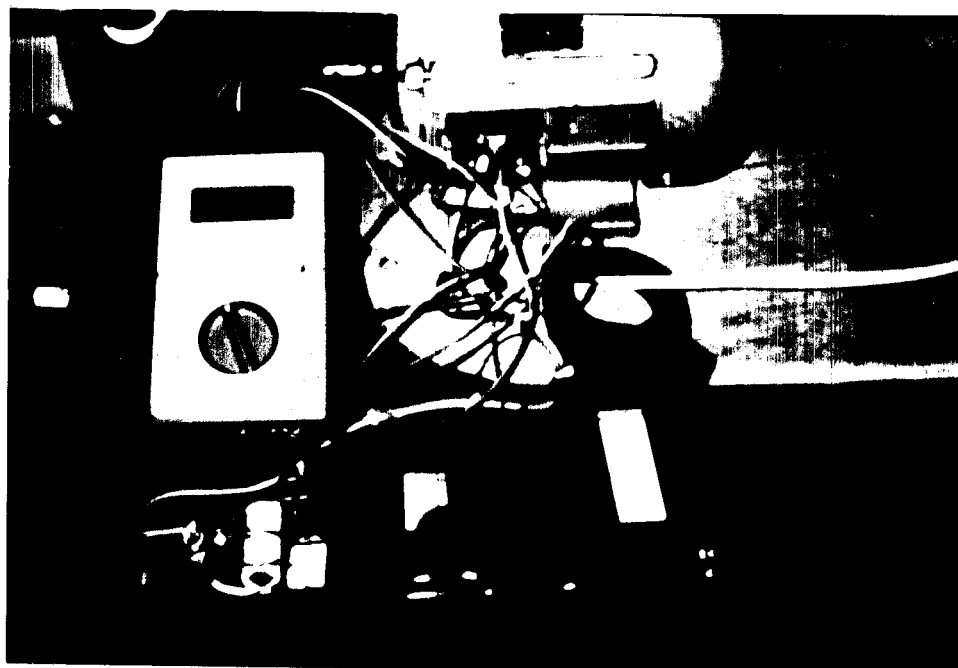
E. Kecepatan motor : 1440 rpm

F. Motor induksi 220 V, 4 pole

$$\text{Slip} = (1500 - 1440)/1500 = 0.04$$

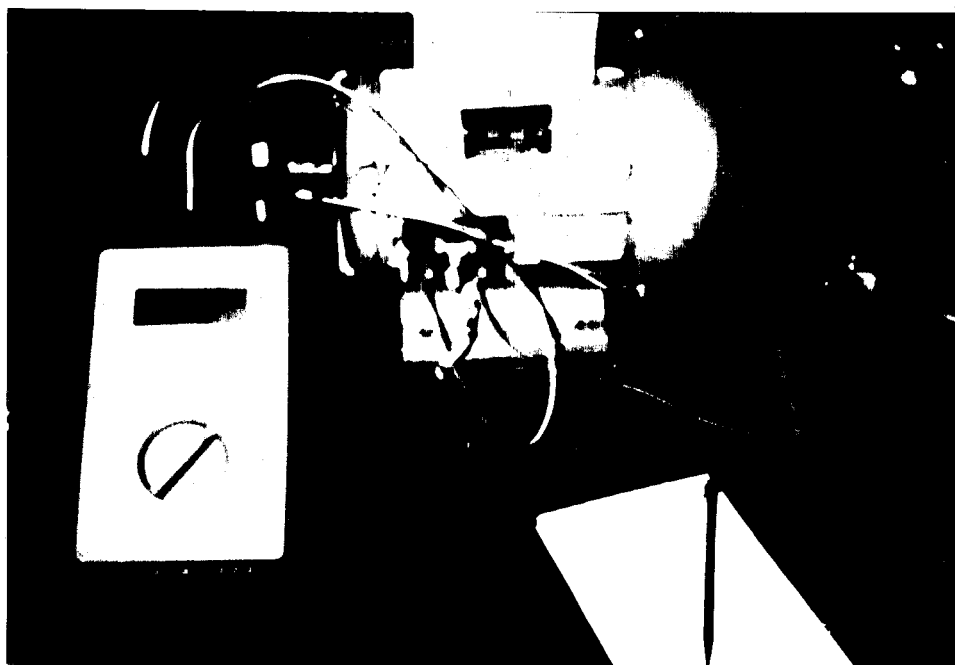
G. Kecepatan putar tanpa beban 1495 rpm

$$\text{Slip} = (1500 - 1495)/1500 = 0.0033$$



GAMBAR 4.3
TEST MOTOR TANPA BEBAN

Untuk pengetesan motor induksi satu fasa 1/2 Hp starting kapasitor ditunjukkan pada gambar 4.4. Semua pengetesan dilakukan dengan Wattmeter Digital buatan SIEMENS. Frekuensi test adalah 50 Hz.



GAMBAR 4.4
LOCKED TEST MOTOR

Dari data-data diatas maka dapat diperoleh :

a. Dari No-Load Test :

$$R_o = P_o / (I_o)^2 = 192 / (4.02)^2 = 11.88 \, \Omega$$

$$Z_o = V_o / I_o = 221 / 4.02 = 54.98 \, \Omega$$

$$X_o = \sqrt{(Z_o^2 - R_o^2)} = \sqrt{(2883.56)} = 53.68 \, \Omega$$

b. Dari Lock-Test :

$$R_L = P_L / I_L^2 = 172 / (4.3)^2 = 9.30 \, \Omega$$

$$Z_L = V_L / I_L = 63.6 / 4.3 = 14.79 \, \Omega$$

$$X_L = \sqrt{(Z_L^2 - R_L^2)} = \sqrt{(132.25)} = 11.50 \, \Omega$$

Maka diperoleh :

$$X_1 = X'_2 = 0.5 X_L = 0.5 \times 11.50 = 5.75 \, \Omega$$

$$X_M = 2X_0 - 1.5X_L = 2 \times 53.68 - 1.5 \times 11.50 = 90.11 \, \Omega$$

dan

$$R_1 = 4.4 \, \Omega \text{ (DC Test)}$$

$$\begin{aligned} R'_2 &= (R_L - R_1) \left(\frac{X'_2 + X_M}{X_M} \right)^2 \\ &= (9.30 - 4.4) \left(\frac{5.75 + 90.11}{90.11} \right)^2 = 5.55 \, \Omega \end{aligned}$$

$$R'_2/2 = 2.775 \, \Omega$$

$$X'_2/2 = 2.875 \, \Omega$$

Tegangan antara rangkaian gandeng magnet (V_{ab}) pada waktu tanpa beban,

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_n - I_n(X_1 + X'_2/2) = 221 - 4.02(5.75 + 2.875) \\ &= 186.33 \text{ Volt} \end{aligned}$$

1. Motor induksi satu fasa dalam keadaan tanpa beban, untuk komponen rotor *forward* pada saat no load kecepatan putaran rotor 1495 rpm, ($s=0.0033$),

$$Z_{rf} = (2.775/0.0033) + j(2.875) = 840.91 \angle 0.19^\circ$$

sedang $Z_f = Z_m \parallel Z_{rf}$

$$\begin{aligned} Z_f &= \frac{j(X_M/2) [(R'_2/2s) + j(X'_2/2)]}{(R'_2/2s) + j[(X_M + X'_2)/2]} \\ &= \frac{j(45.055) [(2.775/0.0033) + j(2.875)]}{(2.775/0.0033) + j(45.055 + 2.875)} \\ &= \frac{-129.53 + j(37887.15)}{840.91 + j(47.93)} = 2.41 + j(44.92) \end{aligned}$$

$$= 44.98 \angle 86.93^\circ$$

dan untuk komponen rotor backward,

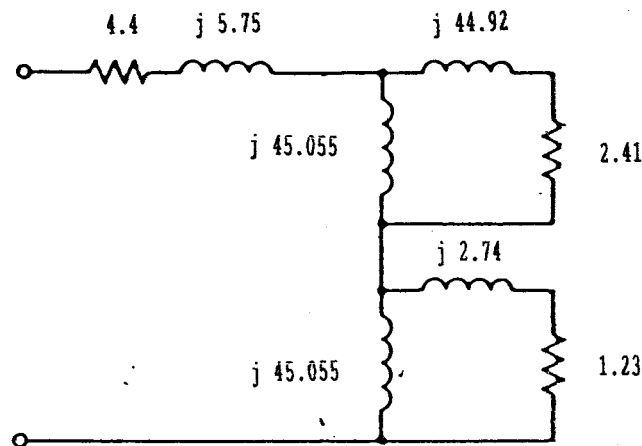
$$Z_{rb} = 1.39 + j(2.875) = 3.19 \angle 64.2^\circ$$

sedang $Z_b = Z_m \parallel Z_{rb}$

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{j(X_m/2) \{ [R'_z/2(2-s)] + j[X'_z/2] \}}{[R'_z/2(2-s)] + j[(X_m + X'_z)/2]} \\ &= \frac{j(45.055) \{ [2.775/(2-0.0033)] + j[2.875] \}}{[2.775/(2-0.0033)] + j(45.055 + 2.875)} \\ &= \frac{-129.53 + j(62.62)}{1.39 + j(47.93)} = 1.23 + j(2.74) \\ &= 3.00 \angle 65.82^\circ \end{aligned}$$

$$Z_{tot} = R_1 + jX_1 + Z_f + Z_b$$

$$\begin{aligned} &= 4.4 + j(5.75) + 2.41 + j(44.92) + \\ &\quad 1.23 + j(2.74) \\ &= 8.04 + j(53.41) = 54.01 \angle 81.44^\circ \end{aligned}$$



GAMBAR 4.5
RANGKAIAN EKIVALEN TANPA BEBAN

$$I_1 = \left[\frac{221}{54.01} \right] \angle -81.44^\circ$$

$$= 4.092 \angle -81.44^\circ \text{ Ampere}$$

Untuk tegangan $V_f = I_1 Z_f$

$$\begin{aligned} V_f &= 4.092 \angle -81.44^\circ \times 44.98 \angle 86.93^\circ \\ &= 184.06 \angle 5.49^\circ \text{ Volt} \end{aligned}$$

maka $I_{rf} = V_f / Z_{rf}$,

$$\begin{aligned} I_{rf} &= 184.06 \angle 5.49^\circ / 840.91 \angle 0.19^\circ \\ &= 0.219 \angle 5.3^\circ \text{ Ampere} \end{aligned}$$

sedang tegangan $V_b = I_1 Z_b$

$$\begin{aligned} V_b &= 4.092 \angle -81.44^\circ \times 3.00 \angle 65.82^\circ \\ &= 12.28 \angle -15.62^\circ \end{aligned}$$

maka $I_{rb} = V_b / Z_{rb}$,

$$\begin{aligned} I_{rb} &= 12.28 \angle -15.62^\circ / 3.19 \angle 64.2^\circ \\ &= 3.85 \angle -79.82^\circ \text{ Ampere} \end{aligned}$$

sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} P_{gf} &= |I_{rf}|^2 \times R_{rf} \\ &= |0.219|^2 \times 840.91 = 40.33 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{gb} &= |I_{rb}|^2 \times R_{rb} \\ &= |3.85|^2 \times 1.39 = 20.6 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_m &= (1 - s)(P_{gf} - P_{gb}) \\ &= (1 - 0.0033)(40.33 - 20.6) = 19.66 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$n_s = 120(50)/4 = 1500 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = (2\pi \times 1500)/60 = 157.08 \text{ rad/s}$$

Torsi output tanpa beban :

$$\begin{aligned} T_m &= (1/\omega_s)(P_{gf} - P_{gb}) = P_m/\omega_s \\ &= 19.66/157.08 \\ &= 0.1252 \text{ N-m} \end{aligned}$$

Dan efisiensi motor,

$$\eta = P_m / P_i$$

$$= 19.66 / 192 = 0.102$$

Untuk rugi daya pada belitan utama :

$$P_{la} = |I_1|^2 R_a$$

$$= |4.092|^2 \times 4.4 = 73.68 \text{ Watt}$$

Rugi daya rotor arah maju (*forward*) ;

$$P_{lrf} = s P_{gf}$$

$$= 0.0033 \times 40.33 = 0.133 \text{ Watt}$$

Rugi daya rotor arah mundur (*backward*) ;

$$P_{lrb} = (2 - s) P_{gb}$$

$$= (2 - 0.0033) \times 20.6 = 41.13 \text{ Watt}$$

Total rugi-rugi,

$$P_l = P_{lrf} + P_{lrb} + P_{la}$$

$$= 0.133 + 41.13 + 73.68 = 114.94 \text{ Watt}$$

2. Beban yang terpasang pada motor yaitu pompa sentrifugal dan porosnya terhubung pada poros motor dengan menggunakan tali kipas (*fan-belt*). Dari data percobaan rangkaian berbeban diperoleh,

Putaran rotor 1472 rpm

Daya input 240 Watt ; Arus Input 4.2 Ampere

Tegangan input 221 Volt, $\cos \phi = 0.26$

untuk komponen rotor *forward* pada saat berbeban kecepatan putaran rotor 1472 rpm, ($s=0.012$),

$$Z_{rf} = (2.775 / 0.012) + j(2.875) = 231.27 \angle 0.71^\circ$$

$$Z_f = Z_m \parallel Z_{rf}$$

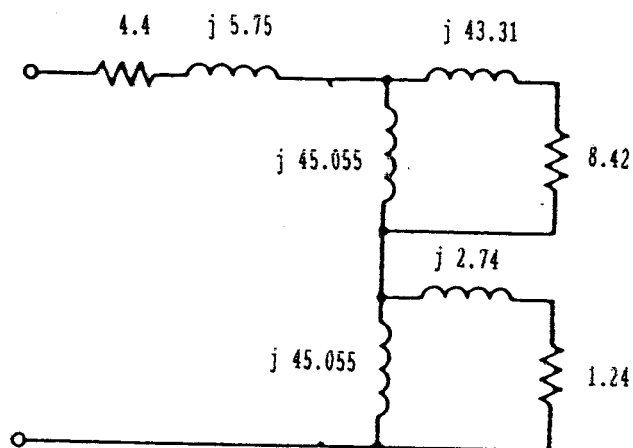
$$\begin{aligned}
 Z_f &= \frac{j(45.055) [231.25 + j(2.875)]}{(231.25) + j[(45.055 + 2.875)]} \\
 &= \frac{-129.53 + j(10418.97)}{231.25 + j(47.93)} = 8.42 + j(43.31) \\
 &= 44.12 \angle 79^\circ
 \end{aligned}$$

dan untuk komponen rotor *backward*,

$$Z_{rb} = 2.775 / (2 - 0.012) + j(2.875) = 3.2 \angle 64.04^\circ$$

$$\begin{aligned}
 Z_b &= \frac{j(45.055) [1.4 + j(2.875)]}{1.4 + j(47.93)} \\
 &= \frac{-129.53 + j(63.08)}{1.4 + j(47.93)} = 1.24 + j(2.74) \\
 &= 3 \angle 65.65^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{tot} &= R_1 + jX_1 + Z_f + Z_b \\
 &= 4.4 + j(5.75) + 8.42 + j(43.31) + \\
 &\quad 1.24 + j(2.74) \\
 &= 14.06 + j(51.8) = 53.67 \angle 74.81^\circ
 \end{aligned}$$



GAMBAR 4.6
RANGKAIAN EKIVALEN BERBEBAN

$$I_1 = \left[\frac{221}{53.67} \right] \angle -74.81^\circ$$

$$= 4.118 \angle -74.81^\circ \text{ Ampere}$$

Daya input

$$\begin{aligned} P_i &= V_i I_i \cos \phi \\ &= 221 \times 4.118 \cos (-74.81) = 238.46 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Untuk tegangan

$$\begin{aligned} V_f &= I_1 Z_f = 4.118 \angle -74.81^\circ \times 44.12 \angle 79^\circ \\ &= 181.69 \angle 4.19^\circ \text{ Volt} \end{aligned}$$

dan,

$$\begin{aligned} I_{rf} &= V_f / Z_{rf} = 181.69 \angle 4.19^\circ / 231.27 \angle 0.71^\circ \\ &= 0.79 \angle 3.48^\circ \text{ Ampere} \end{aligned}$$

sedang,

$$\begin{aligned} V_b &= I_1 Z_b = 4.118 \angle -74.81^\circ \times 3 \angle 65.65^\circ \\ &= 12.35 \angle -9.16^\circ \text{ Volt} \end{aligned}$$

dan,

$$\begin{aligned} I_{rb} &= V_b / Z_{rb}, = 12.35 \angle -9.16^\circ / 3.2 \angle 64.04^\circ \\ &= 3.86 \angle -73.2^\circ \text{ Ampere} \end{aligned}$$

sehingga diperoleh daya output mekanik :

$$\begin{aligned} P_{gf} &= |I_{rf}|^2 \times R_{rf} = |0.79|^2 \times 231.25 = 144.32 \text{ Watt} \\ P_{gb} &= |I_{rb}|^2 \times R_{rb} = |3.86|^2 \times 1.4 = 20.86 \text{ Watt} \\ P_m &= (1 - s)(P_{gf} - P_{gb}) = 0.988 \times (144.32 - 20.86) \\ &= 122 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Torsi output :

$$\begin{aligned} T_m &= (1/\omega_s)(P_{gf} - P_{gb}) = P_m/\omega_s = 122/157.08 \\ &= 0.78 \text{ N-m} \end{aligned}$$

Dan efisiensi motor, $\eta = P_m/P_i = 122/238.46 = 0.511$

Untuk rugi daya pada belitan utama :

$$P_{le} = |I_1|^2 R_1 = |4.118|^2 \times 4.4 = 74.61 \text{ Watt}$$

Rugi daya rotor arah maju (*forward*) ;

$$P_{lrf} = sP_{gf} = 0.012 \times 144.32 = 1.73 \text{ Watt}$$

Rugi daya rotor arah mundur (*backward*) ;

$$P_{lrb} = (2-s)P_{gb} = (2 - 0.012) \times 20.86 = 41.47 \text{ Watt}$$

Total rugi,

$$\begin{aligned} P_l &= P_{lrf} + P_{lrb} + P_{le} \\ &= 1.73 + 41.47 + 74.61 = 117.81 \text{ Watt} \end{aligned}$$

3. Bila motor dijalankan dengan kecepatan 1440 rpm dan arus input 4.3 Ampere sama seperti yang tertulis plat nama motor, untuk komponen rotor *forward* pada saat rated load putaran rotor 1440 rpm, ($s=0.04$),

$$Z_{rf} = (2.775/0.04) + j(2.875) = 69.43 \angle 2.37^\circ$$

$$\begin{aligned} Z_f &= \frac{j(45.055) [(69.375) + j(2.875)]}{69.375 + j(47.93)} \\ &= \frac{-129.53 + j(3125.69)}{69.375 + j(47.93)} = 19.81 + j(31.37) \\ &= 37.10 \angle 57.73^\circ \end{aligned}$$

dan untuk komponen rotor *backward*,

$$Z_{rb} = (2.775/(2-0.04)) + j(2.875) = 3.2 \angle 63.78^\circ$$

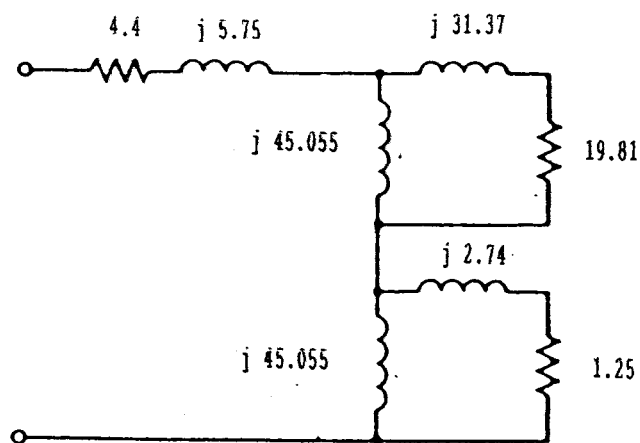
$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{j(45.055) [(1.42) + j(2.875)]}{1.42 + j(47.93)} \\ &= \frac{-129.53 + j(63.97)}{1.42 + j(47.93)} = 1.25 + j(2.74) \\ &= 3.01 \angle 65.48^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{tot} &= R_1 + jX_1 + Z_f + Z_b \\ &= 4.4 + j(5.75) + 19.81 + j(31.37) + \\ &\quad 1.25 + j(2.74) \end{aligned}$$

$$= 25.46 + j(39.86) = 47.3 \angle 57.43^\circ$$

$$I_1 = \left[\frac{221}{47.3} \right] \angle -57.43^\circ$$

$$= 4.67 \angle -57.43^\circ \text{ Ampere}$$



GAMBAR 4.7
RANGKAIAN EKIVALEN BEBAN RATED

Daya input :

$$P_i = V_i I_1 \cos \phi = 221 \times 4.67 \cos (-57.43)$$

$$= 555.6 \text{ Watt}$$

Untuk tegangan

$$V_f = I_1 Z_f = 4.67 \angle -57.43^\circ \times 37.10 \angle 57.73^\circ$$

$$= 173.26 \angle 0.3^\circ$$

dan

$$I_{rf} = V_f / Z_{rf} = 173.26 \angle 0.3^\circ / 69.43 \angle 2.37^\circ$$

$$= 2.49 \angle -2.07^\circ \text{ Ampere}$$

sedang

$$V_b = I_1 Z_b = 4.67 \angle -57.43^\circ \times 3.01 \angle 65.48^\circ$$

$$= 14.06 \angle 8.05^\circ$$

maka

$$I_{rb} = V_b / Z_{rb} = 14.06 \angle 8.05^\circ / 3.2 \angle 63.78^\circ$$

$$= 4.39 \angle -55.73^\circ \text{ Ampere}$$

sehingga diperoleh

$$P_{gf} = |I_{rf}|^2 \times R_{rf} = |2.49|^2 \times 69.375 = 430.13 \text{ Watt}$$

$$P_{gb} = |I_{rb}|^2 \times R_{rb} = |4.39|^2 \times 1.42 = 27.37 \text{ Watt}$$

$$\begin{aligned} P_m &= (1 - s)(P_{gf} - P_{gb}) = (1 - 0.04)(430.13 - 27.37) \\ &= 386.65 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Torsi output :

$$\begin{aligned} T_m &= (1/\omega_s)(P_{gf} - P_{gb}) = P_m/\omega_s = 484.53/157.08 \\ &= 2.461 \text{ N-m} \end{aligned}$$

Dan efisiensi motor :

$$\eta = P_m / P_i = 386.65 / 555.6 = 0.7$$

Untuk rugi daya pada belitan utama :

$$P_{ls} = |I_1|^2 R_1 = |4.67|^2 \times 4.4 = 95.96 \text{ Watt}$$

Rugi daya rotor arah maju (*forward*) :

$$P_{lrf} = sP_{gf} = 0.04 \times 430.13 = 17.21 \text{ Watt}$$

Rugi daya rotor arah mundur (*backward*) :

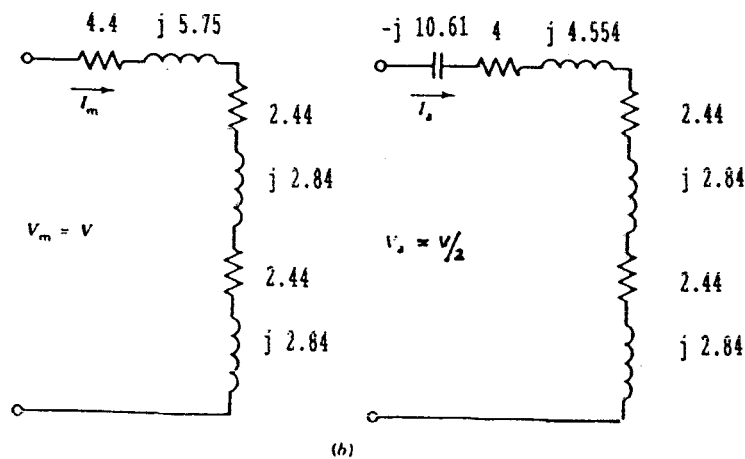
$$P_{lrb} = (2 - s)P_{gb} = (2 - 0.04) \times 27.37 = 53.65 \text{ Watt}$$

Total rugi-rugi,

$$\begin{aligned} P_l &= P_{lrf} + P_{lrb} + P_{ls} \\ &= 17.21 + 53.65 + 95.96 = 166.82 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Pada perhitungan (1), (2) dan (3) diatas keadaan triac tidak konduksi (OFF state) dan rangkaian starting tidak berpengaruh terhadap motor.

4. Untuk saat motor start dimana motor dalam keadaan diam akan berputar ($s=1$) rangkaian starting akan terhubung paralel dengan belitan utama seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8, dan komponen rotor *forward* sama dengan rotor *backward*.



GAMBAR 4.8

RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR KAPASITOR SAAT STARTING ($s=1$)

$$Z_{rf} = Z_{rb} = 2.775 + j(2.875)$$

sedang

$$Z_f = Z_m \parallel Z_{rf}, \quad Z_b = Z_m \parallel Z_{rb}, \quad \text{dan} \quad Z_f = Z_b,$$

$$Z_f = Z_b = \frac{j(45.055) [(2.775) + j(2.875)]}{2.775 + j(47.93)}$$

$$= \frac{-129.53 + j(125.02)}{2.775 + j(47.93)} = 2.44 + j(2.84)$$

$$= 3.74 \angle 49.33^\circ$$

$$Z_{tot} = R_t + jX_t + Z_f + Z_b$$

$$= 4.4 + j(5.75) + 2[2.44 + j(2.84)]$$

$$= 9.28 + j(11.43) = 14.72 \angle 50.93^\circ$$

$$\begin{aligned}
 I_m &= \frac{V_m}{Z_a + Z_f + Z_b} \\
 &= \left[\frac{221}{13.74} \right] \angle -50.93^\circ \\
 &= 15 \angle -50.93^\circ \text{ Ampere}
 \end{aligned}$$

sedang impedansi belitan bantu dan kapasitor starting adalah :

$$\begin{aligned}
 R_a &= P_a / (I_a)^2 = 93.6 / (4.03)^2 = 5.763 \\
 Z_a &= V_a / I_a = 29.6 / 4.03 = 7.345 \\
 X_a &= \sqrt{(Z_a^2 - R_a^2)} = \sqrt{(20.737)} = 4.554 \\
 X_c &= 1 / \omega C = 1 / (2\pi \times 50 \times 300 \times 10^{-6}) = 10.61 \\
 Z_a &= R_{aux} + j(X_a - X_c) \\
 &= 4.0 + j(4.554 - 10.61) = 4.0 - j(6.056) \\
 &= 7.258 \angle -56.56^\circ
 \end{aligned}$$

ratio impedansi belitan bantu dan belitan utama,

$$\begin{aligned}
 a &= 7.345 / (7.24/2) \\
 &= 2.03
 \end{aligned}$$

Impedansi total rangkaian starting,

$$\begin{aligned}
 Z_s &= Z_a + a^2(Z_f + Z_b) \\
 &= 4.0 - j(6.056) + (2.03)^2[4.88 + j(5.68)] \\
 &= 24.11 + j(17.35) = 29.7 \angle 35.74^\circ
 \end{aligned}$$

Tegangan V_a dari rangkaian ekivalen gambar 4.8 adalah,

$$\begin{aligned}
 V_a &= 0.5 Z_{mtot} I_m \\
 &= 0.5 \times 14.72 \angle 50.93^\circ \times 15 \angle -50.93^\circ \\
 &= 110.5 \angle 0^\circ
 \end{aligned}$$

$$I_a = \frac{V_a}{Z_a + a^2(Z_f + Z_b)}$$

$$= \left[\frac{110.5}{29.7} \right] \angle -35.74^\circ = 3.72 \angle -35.74^\circ \text{ Ampere}$$

arus total saat motor start,

$$\begin{aligned} I_{\text{start}} &= I_m + I_a = 15 \angle -50.93^\circ + 3.72 \angle -35.74^\circ \\ &= 12.47 - j(13.82) = 18.61 \angle -48^\circ \text{ Ampere} \end{aligned}$$

tegangan pada kapasitor starting,

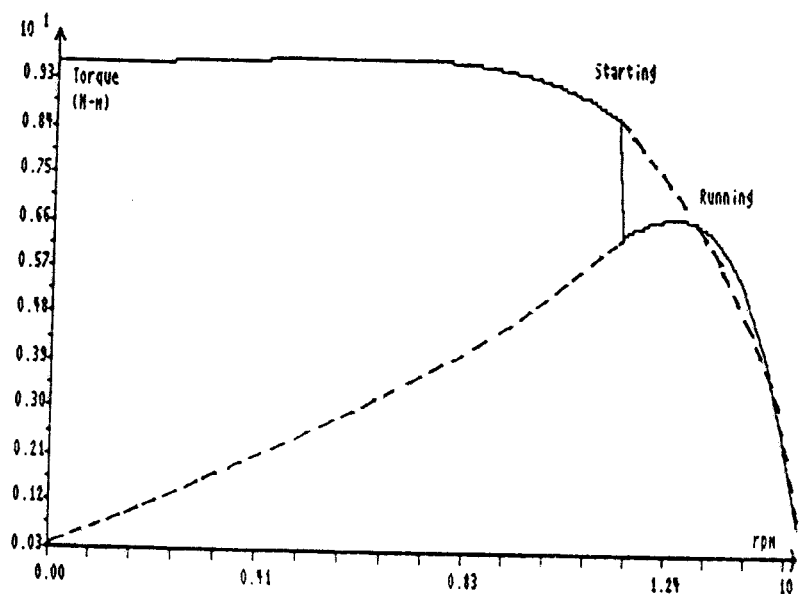
$$\begin{aligned} E_c &= Z_c I_a = 10.61 \angle -90^\circ \times 3.72 \angle -35.74^\circ \\ &= 39.47 \angle -125.74^\circ \text{ Volt} \end{aligned}$$

power faktor saat start ($\phi = -48^\circ$), $\cos \phi = 0.67$, daya input :

$$P_{\text{in}} = V_o I_s \cos \phi = 221 \times 18.61 \times 0.67 = 2755.58 \text{ Watt}$$

torsi start motor,

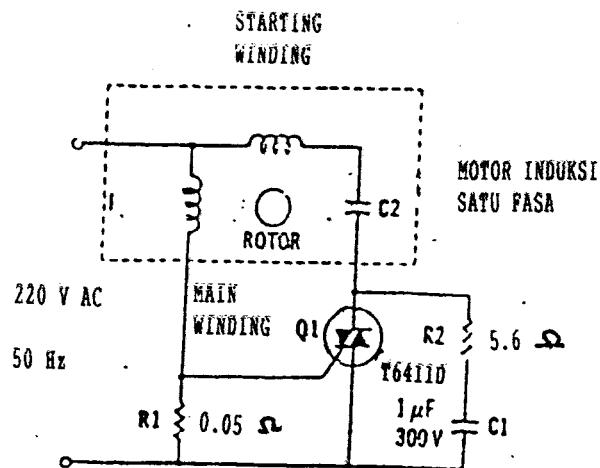
$$\begin{aligned} T_s &= \frac{2a |I_m| |I_a| (R_f + R_b) \sin(\theta_a + \theta_m)}{\omega_{\text{syn}}} \\ &= \frac{2 \times 1.584 |15| |3.72| (4.88) \sin(26.76 + 50.93)}{2\pi \times 1500/60} \\ &= 8.755 \text{ N-m} \end{aligned}$$



GAMBAR 4.9^a
KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI SATU FASA 1/2 HP
STARTING KAPASITOR

4.3.3 Analisa Rangkaian Switch Triac

rangkaian triac sebagai switch pada rangkaian starting motor induksi satu fasa dengan kapasitor starting ditunjukkan pada gambar 4.10.



GAMBAR 4.10
RANGKAIAN TRIAC SEBAGAI SWITCH PADA MOTOR INDUKSI SATU FASA DENGAN KAPASITOR SEBAGAI STARTING

Tegangan $V_s = V = \sqrt{2} \sin(\phi)$ dan $\phi = -48^\circ = -0.27\pi$ rad pada saat motor start. Sehingga didapatkan arus beban rms, $I_{L(rms)}$,

$$\begin{aligned}
 I_{L(rms)} &= \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\phi}^{\phi+\pi} I^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (4.1) \\
 &= \left[\frac{I_1^2}{2\pi} \left| \omega t - \sin 2\omega t \right|_{\phi}^{\phi+\pi} \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{I_1^2}{2\pi} \left| \omega t - \sin 2\omega t \right|_{-0.27\pi}^{0.79\pi} \right]^{1/2}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{I_1}{\sqrt{2\pi}} = 0.3989 I_1$$

$$I_s = I_1 = 18.61, I_{L(rms)} = 0.3989 \times 18.61 = 7.42 \text{ Ampere}$$

Dengan memakai cara yang sama untuk arus rms yang mengalir pada triac, $I_a = 3.72 \angle -35.74^\circ$, $\phi = -0.198\pi$ rad,

$I_{a(rms)} = 0.3989 \times 3.72 = 1.48$ Ampere, dan arus rata-rata yang melalui triac,

$$\begin{aligned} I_{T(ave)} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\phi}^{\phi+\pi} I_a \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{I_a}{2\pi} (\cos(\phi) - \cos(\phi+\pi)) \quad (4.2) \\ &= \frac{3.72}{2\pi} (\cos(0.198\pi) - \cos(1.198\pi)) \\ &= 0.96 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

sedang $I_m = 15 \angle -50.93^\circ$, $\phi = -0.283\pi$,

$I_{m(rms)} = 0.3989 \times 15 = 5.98$ Ampere, dan arus rata-rata yang melalui tahanan R_1 ,

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{5.98}{2\pi} (\cos(-0.283\pi) - \cos(0.717\pi)) \\ &= 1.2 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Pada saat start arus I_m akan melalui tahanan R_1 pada gate triac, maka didapatkan drop tegangan trigger triac,

$$V_{Rg} = I_{m(rms)} R_1 \quad (4.3)$$

$$= 5.98 \times 0.05 = 0.3 \text{ Volt}$$

sedang tegangan minimal triac agar konduksi $V_g = 0.25$ Volt sehingga tegangan trigger telah cukup kuat membangkitkan triac untuk ON, arus beban yaitu rangkaian starting melewati terminal triac MT_1 dan MT_2 .

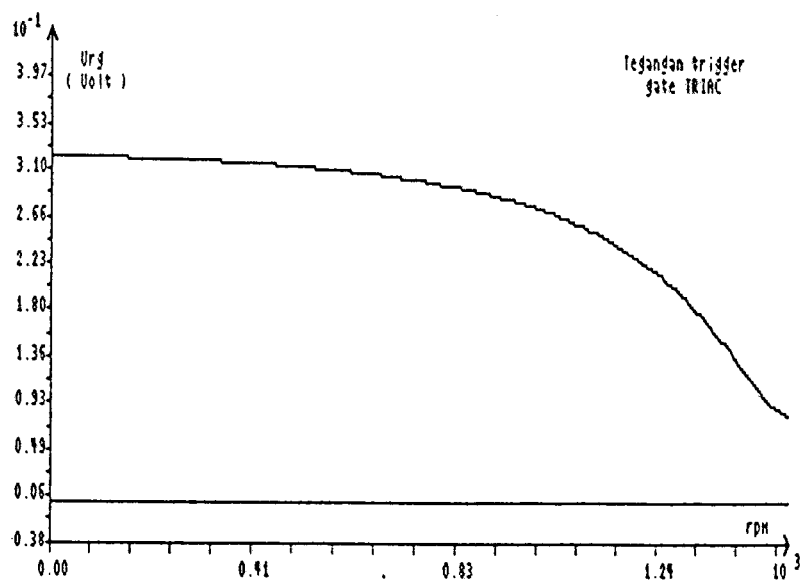
Tabel 4.1 menunjukkan arus $I_{m(rms)}$ yang menyebabkan triac ON saat motor start sampai dengan triac OFF pada saat tegangan trigger < 0.25 Volt. Untuk keadaan selanjutnya triac akan OFF terus.

TABEL 4-1 ARUS $I_{m(RMS)}$ TERHADAP SLIP

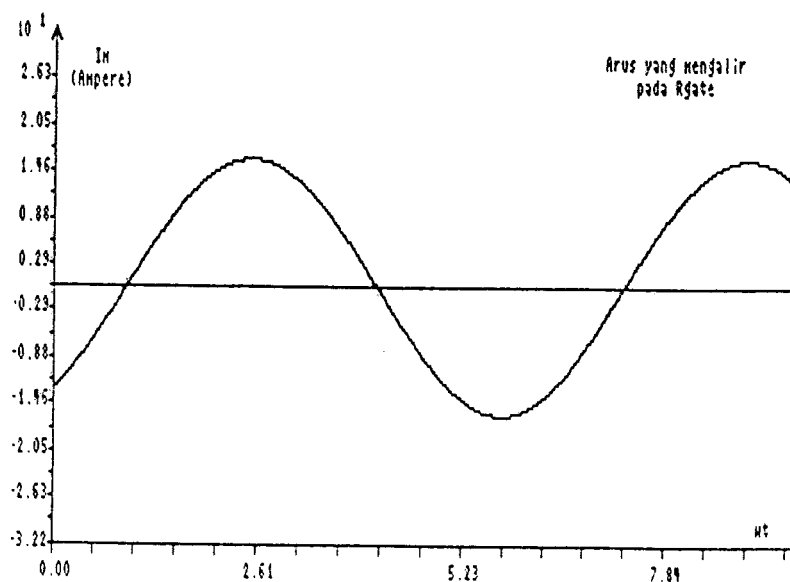
Slip	$I_{m(rms)}$	Vg	Rpm
1.000	6.417	0.321	0
0.933	6.411	0.320	100
0.867	6.393	0.319	200
0.800	6.361	0.318	300
0.733	6.315	0.315	400
0.667	6.251	0.312	500
0.600	6.165	0.308	600
0.533	6.051	0.302	700
0.467	5.900	0.295	800
0.400	5.696	0.284	900
0.333	5.416	0.270	1000
0.267	5.024	0.251	1100
0.260	4.977	0.248	1110
0.200	4.459	0.223	1200
0.133	3.632	0.182	1300
0.066	2.481	0.124	1400
0.040	1.993	0.100	1440
0.006	1.635	0.082	1490

Dari tabel 4-1, kondisi triac akan OFF dan saat itu motor berkecepatan 1110 rpm yang berarti 74% dari kecepatan sinkronnya, kapasitor starting dilepas oleh triac.

Pada gambar 4.11 ditunjukkan kecepatan sebagai fungsi tegangan trigger. Dan gambar 4.12 adalah bentuk sinyal arus yang mengalir pada R1.



GAMBAR 4. 11
KECEPATAN SEBAGAI FUNGSI DARI TEGANGAN TRIGGER GATE TRIAC



GAMBAR 4. 12
ARUS I_m YANG MENGALIR PADA R_1 SEBAGAI TRIGGER

Saat motor induksi dalam keadaan berjalan terus dan triac dalam keadaan OFF, maka rugi daya pada tahanan gate R_a atau R_g ,

$$\begin{aligned} P_{Rg} &= I_m^2 R_g \\ &= (1.993)^2 \times 0.05 = 0.2 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Untuk rangkaian snubber circuit, kondisi motor berjalan impedansi rangkaian starting,

$$\begin{aligned} Z_s &= Z_a + a^2(Z_f + Z_b) \\ &= 14.93 + j(8.7) = 17.28 \angle 30.23^\circ \end{aligned}$$

impedansi rangkaian waktu motor berjalan,

$$\begin{aligned} Z_r &= Z_{\text{snubber}} + Z_s \\ &= 5.6 - j(3183.1) + 14.93 + j(8.7) \\ &= 20.53 - j(3174.4) = 3174.47 \angle -89.63^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_r &= V_a / Z_r = \frac{110 \angle 0^\circ}{3174.47 \angle -89.63^\circ} \\ &= 0.035 \angle 89.63^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_r &= V_a I_r \cos \phi \\ &= 110.5 \times 0.035 \times \cos (89.63) = 0.025 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas ($\cos \phi = 0.006$) pengaruh rangkaian snubber sangat kecil sehingga rangkaian starting tidak berpengaruh terhadap motor.

Untuk rangkaian pembatasan dv/dt pada triac, rangkaian starting elektronik ini didapatkan,

$$dv/dt = 0.632V_s/\tau = 0.632/(R_s + C_s) \quad (4.3)$$

$$\delta = \alpha/\omega_0 = (R_s + R)/2\sqrt{(C_s/(L + L_s))} \quad (4.4)$$

dengan mengabaikan L dan L_s ,

$$V_s = (R_s + R)i + \frac{1}{C_s} \int i \, dt + v_c(t = 0) \quad (4.5)$$

kondisi awal $v_c = 0$, arus pengisian

$$i(t) = \frac{V_s}{R_s + R} e^{-t/\tau} \quad (4.6)$$

dimana $\tau = (R_s + R)C_s$, tegangan antara terminal triac,

$$V_T(t) = V_s - \frac{R V_s}{R_s + R} e^{-t/\tau} \quad (4.7)$$

untuk $t=0, V_T(0)=0 = V_s - \frac{R V_s}{R_s + R} e^{-t/\tau}$

saat $t=\tau, V_T(\tau) = V_s - \frac{0.632 R V_s}{R_s + R}$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_T(\tau) - v_T(0)}{\tau} = \frac{0.368 R V_s}{C_s(R_s + R)} \quad (4.8)$$

$R_s = 5.6 \Omega, R = 2 \Omega, C_s = 1 \mu F = 1 \times 10^{-6}, V_s = 110.5 \text{ Volt},$

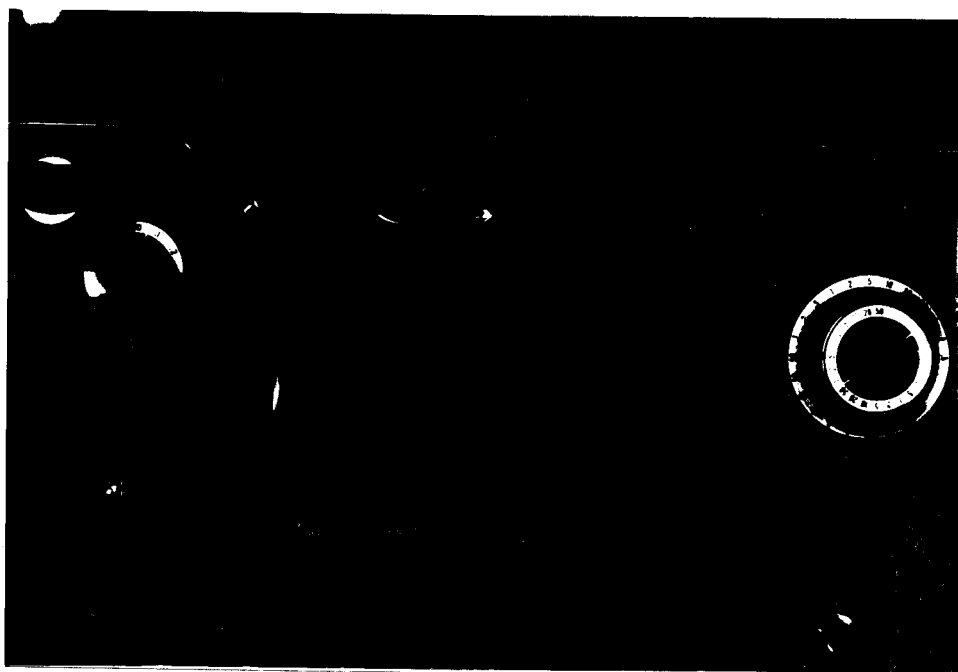
$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.368 \times 2 \times 110.5}{1(5.6 + 2)} = 10 \text{ V}/\mu s$$

dari data sheet triac tipe T6411D $\frac{dv}{dt} = 30 \text{ V}/\mu s$

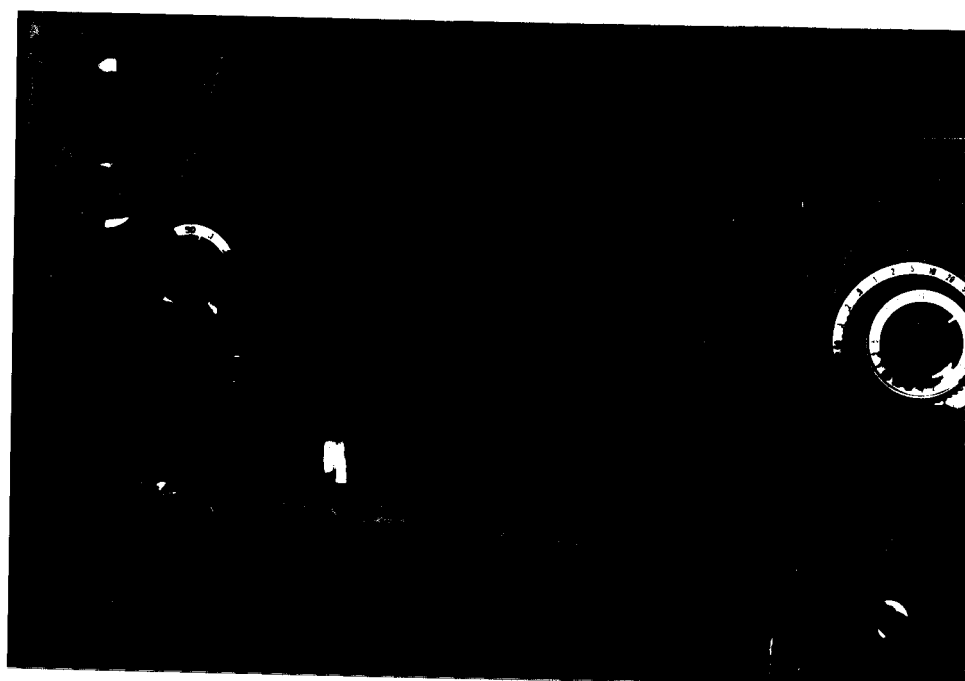
Snubber loss,

$$\begin{aligned} P_s &= 0.5 C_s V_s^2 f_s \\ &= 0.5 \times 1 \times 10^{-6} \times 110.5^2 \times 50 \\ &= 0.3 \text{ Watt} \end{aligned} \quad (4.9)$$

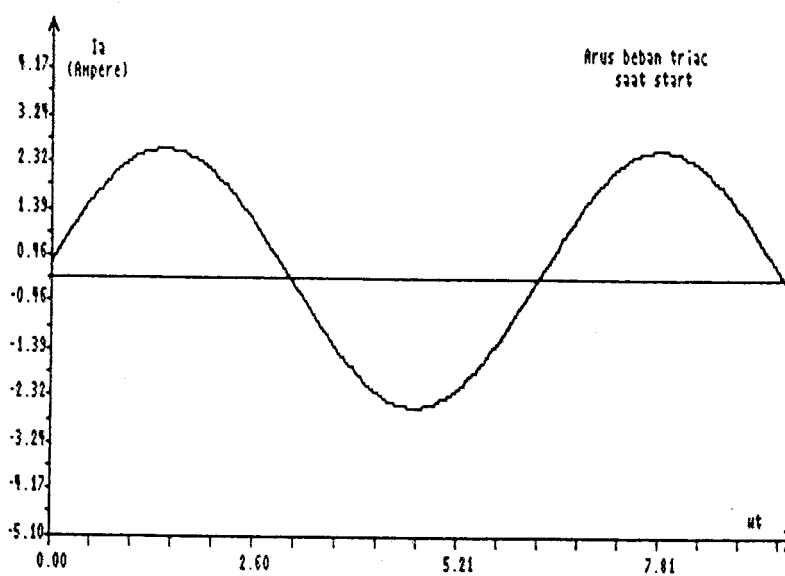
Pada gambar 4.13 dan 4.14 ditunjukkan oleh osiloskop bentuk sinyal trigger dan sinyal tegangan sumber. Dan pada gambar 4.15 serta 4.16 adalah bentuk sinyal yang dilukiskan dari program perhitungan.



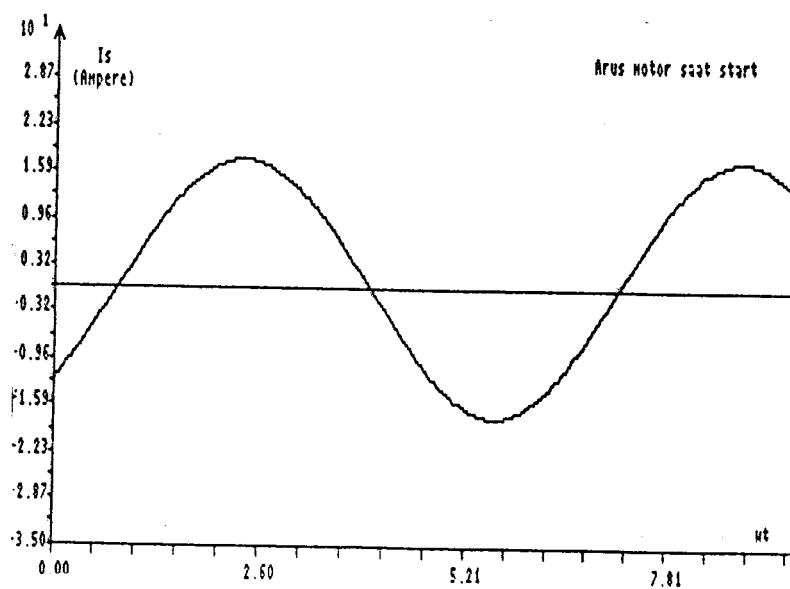
GAMBAR 4.13
SINYAL TEGANGAN PADA GATE DAN TEGANGAN SUMBER



GAMBAR 4.14
SINYAL TEGANGAN PADA R1 PADA SAAT MOTOR START



GAMBAR 4.15
ARUS BEBAN YANG MENGALIR PADA TERMINAL TRIAC



GAMBAR 4.16
ARUS TOTAL YANG MENGALIR PADA SAAT MOTOR START

BAB V

KESIMPULAN

Motor induksi satu fasa dengan kapasitor starting yang memakai mekanik sentrifugal switch sebagai pemutus rangkaian kapasitor starting pada motor berkapasitas 1/2Hp mempunyai kekurangan-kekurangan :

- a. Bahan terbuat dari plat besi tipis, kurang baik
- b. Menimbulkan bunga api saat pemutusan yang dapat merusakkan penghantar switch.
- c. Mekanik sentrifugal terletak di rotor dan berputar
- d. Putaran dengan rpm kecil sudah melepas kapasitor
- e. Torsi maksimum putaran tidak bisa diatur bebas
- f. Tidak bisa mendapatkan kerja motor yang optimal

Meskipun demikian sentrifugal switch mekanik mempunyai keuntungan :

- a. Arus start tidak terlampau besar
- b. Bahan tidak mahal
- c. Penempatan langsung pada rotor dan tidak terlihat dari luar
- d. Motor dapat dijalankan meskipun tegangan supply kurang dari tegangan nominalnya.

Sedangkan untuk elektronik starting switch dengan menggunakan triac mempunyai keuntungan :

- a. Tidak menimbulkan bunga api saat pemutusan kapasitor starting
- b. Arus start cukup untuk membuat kopel mula besar
- c. Lebih cepat mencapai kecepatan maksimal
- d. Torsi maksimum putaran dapat diatur melalui tegangan trigger pada gate triac.
- e. Pemeliharaan terhadap motor kecil.
- f. Tahan lama dan lebih kuat karena hanya digunakan saat motor start.

Tetapi penggunaan triac sebagai switch pada elektronik starting untuk motor induksi satu fasa mempunyai kelemahan yaitu :

- a. Arus start yang maksimum sehingga dapat mencapai torsi yang maksimum.
- b. Tidak dapat bekerja jika tegangan trigger pada $gate < V_{gt}$ triac minimalnya.
- c. Triac sebagai komponen utamanya harus disesuaikan arus maksimum yang diperbolehkan melewati terminal triac (MT_1 dan MT_2).

DAFTAR PUSTAKA

1. Dennis O'Kelly, *PERFORMANCE AND CONTROL OF ELECTRICAL MACHINES*, Mc. Graw-Hill Book Company, UK, 1991.
2. Dewan S.B, Slemon G.R, Straughen A, *POWER SEMICONDUCTOR DRIVES*, John Wiley & Sons, Toronto, Canada, 1984.
3. Fitzgerald, A.E, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans, Djoko Achyanto, Ir, Msc.EE, *MESIN-MESIN LISTRIK*, Penerbit Airlangga, Jakarta, 1986.
4. McPherson George, Robert D. Laramore, *AN INTRODUCTION TO ELECTRICAL MACHINES AND TRANSFORMERS*, John Wiley & Sons, Inc, secon edition, Singapore, 1990.
5. Irving M. Gottlieb, *SOLID STATE POWER ELECTRONICS*, Howard W. Sams & Co, Indiana, 1979.
6. Kaufman M, Arthur H.S, *HANDBOOK OF ELECTRONICS CALCULATIONS*, Mc. Graw-Hill Book Company, USA, 1979.
7. PC. Sen, *PRINCIPLES OF ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS*, John Wiley & Sons, Inc, Singapore, 1989.
8. Philip L. Alger, *INDUCTION MACHINES*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1970
9. Robert Rosenberg, BS, MA, *ELECTRIC MOTOR REPAIR*, Rinehart Press, Second Edition, San Francisco, 1970
10. Sumanto, Drs, Ma, *MOTOR ARUS BOLAK-BALIK (MOTOR AC)*, Andi Offset, Yogyakarta, 1989.
11. Timothy J. Maloney, *INDUSTRIAL SOLID-STATE ELECTRONICS*, second edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1986.

12. Williams BW, *POWER ELECTRONICS DEVICES, DRIVERS AND APPLICATIONS*, John Wiley & Sons, New york, 1987.
13. Wolfgang Müller, *ELECTRICAL POWER ENGINEERING PROFICIENCY COURSE*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, Federal Republic of Germany, 1988.
14. Zuhail, *DASAR TEKNIK TENAGA LISTRIK DAN ELEKTRONIKA DAYA*, cetakan ketiga, PT. Gramedia, Jakarta, 1992.
15. -----, *RCA THYRISTORS/RECTIFIERS*, RCA Corporation, Somerville, N.J, USA, 1974.

L A M P I R A N

For Control Systems Application in Airborne and Ground Support Type Equipment
25 A. 400 Mc Triacs (2NS806-2NS808)

systems. They can also be used in air-conditioning and photocopying equipment.

Types 2N5441-43 and T6401 series employ a press-fit package. Types 2N5444-46, 2N5806-09, and T6411 series employ a stud package. T6421 series and T6421 series employ an isolated-stud package.

- **drive Capability - 100 Apts**
- **Shorted-Emitter, Center-Gate Design**
- **Low Switching Losses**
- **Low On-State Voltage at High Current Levels**
- **Low Thermal Resistance**

- Available in 300 or 300FX Screening
- Commutating delay capability Characterized at 400 Hz

A diagram of a gate valve assembly. It shows a vertical stem with a threaded section at the bottom. A gate is attached to the top of the stem. Labels point to the GATE, NUT, and WRENCH.

* In accordance with JEDEC registration data format 98B-04, 98B-05 listed for the JEDEC 129A-04 and types
 † For either polarity of main terminal 2 voltage V_{G1} with reference to main terminal 1
 ‡ For either polarity of gate voltage V_{G1} with reference to main terminal 1
 § For temperature measurement where not as Recommended Condition

	-	2045401	2045442	-	2045443	
20-A		2045444	2045445	-	2045446	
	2045406	2045408	2045410	2045402	2045404	
	2045416	2045418	2045420	2045412	2045414	
20-A	2045415	2045417	2045419	2045411	2045413	
	2045425	2045426	2045428	2045421	2045423	
20-A	-	2045403	2045407	2045405	2045409	
2045401	50	200	400	500	600	V
2045402						
			40			A
			40			A
			40			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			A
			30			

WARNING: The ceramic of the isolated steel package contains beryllium oxide. Do not crush, grind, or abrade this part because the dust resulting from such action may be hazardous if inhaled. Disposal should be by burial.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at Maximum Average Output Current Specified and at Indicated Case Temperature (T_{ca})

CHARACTERISTICS	SYMBOL	LIMITS			UNITS
		MIN.	TYP.	MAX.	
Peak Off-State Current: ⁶ Gate open, $V_{DS} =$ Max. rated value $T_J = 150^\circ\text{C}$, 100-A typical - 100°C, 100-A typical - 115°C, 125-A typical	I_{PO}	-	0.2	4"	mA
Maximum On-State Voltage: ⁶ For $I_T = 100$ A (peak), $T_C = 25^\circ\text{C}$, 100-A typical For $I_T = 50$ A (peak), $T_C = 25^\circ\text{C}$, 100-A typical For $I_T = 100$ A (peak), $T_C = 25^\circ\text{C}$, 100-A typical - 35 A (peak), pulse width ≤ 1 ms, duty cycle $\leq 1\%$, $I_C = 100$ mA, $T_C = 25^\circ\text{C}$, 100-A typical	V_{DS}	-	1.7	2	V
DC Holding Current: ⁶ Gate open, initial principal current = 600-mA std., $v_g = 12$ V $T_C = 25^\circ\text{C}$, 100-A & 40-A typical - 75°C, 125-A typical - 85°C, 100-A typical - 95°C, 125-A typical For other case temperatures	I_{HO}	-	75	80	mA
See Figs. 13 & 14					
Critical Rate of Rise of Commutation Voltage: ⁶ $V_{DO} = V_{DS(on)} - V_{DS(off)} = 40$ A, commutating di/dt = 22 A/ms, gate untriggered $T_C = 70^\circ\text{C}$, 100-A, Power-MOS typical - 95°C, 100-A, Stud typical - 90°C, 100-A, Isolated-stud typical	di/dt	5"	30	-	V/ms
$V_{DO} = V_{DS(on)} - V_{DS(off)} = 30$ A, commutating di/dt = 16 A/ms, gate untriggered $T_C = 95^\circ\text{C}$, 100-A, Power-MOS typical - 90°C, 100-A, Stud typical - 85°C, 100-A, Isolated-stud typical		5"	30	-	
$V_{DO} = V_{DS(on)} - V_{DS(off)} = 25$ A, commutating di/dt = 16 A/ms, gate untriggered $T_C = 90^\circ\text{C}$, 100-A, Stud typical		5"	30	-	
Critical Rate of Rise of On-State Voltage: ⁶ For $V_D = V_{DS(on)}$, exponential voltage rise, gate open $T_C = 110^\circ\text{C}$, 100-A typical: 2N5441, 2N5444, 764200 2N5442, 2N5445, 764200 2N5443, 2N5446, 764200 $T_C = 100^\circ\text{C}$, 100-A typical: 764010, 764110, 764210 764010, 764110, 764210 764010, 764110, 764210 $T_C = 115^\circ\text{C}$, 125-A typical	di/dt	50"	200	-	V/ms
		30"	150	-	
		20"	100	-	
DC Gate-Trigger Current: ^{6a} $V_D = 12$ V ldc, $R_L = 30\Omega$, $T_C = 25^\circ\text{C}$ Mode V_{GT2} V_G I ⁺ positive positive 100-A & 30-A typical - 125-A typical III ⁺ negative negative 100-A & 30-A typical - 125-A typical I ⁻ positive negative 100-A & 30-A typical - 125-A typical III ⁻ negative positive 100-A & 30-A typical - 125-A typical	I_{GT}	-	75	80	mA
		-	30	80	
		-	20	50	
$V_D = 12$ V ldc, $R_L = 30\Omega$, $T_C = -85^\circ\text{C}$ Mode V_{GT2} V_G I ⁺ positive positive 40-A III ⁺ negative negative 40-A I ⁻ positive negative 40-A III ⁻ negative positive 40-A	I_{GT}	-	-	125"	mA
		-	-	125"	
		-	-	240"	
$V_D = 12$ V ldc, $R_L = 30\Omega$, $T_C = 45^\circ\text{C}$ Mode V_{GT2} V_G I ⁺ positive positive 55-A III ⁺ negative negative 55-A I ⁻ positive negative 55-A III ⁻ negative positive 55-A	I_{GT}	-	32	120	mA
		-	96	120	
		-	-	170	
DC Gate-Trigger Voltage: ^{6a} $V_D = 12$ V ldc, $R_L = 30\Omega$ $T_C = 25^\circ\text{C}$, 100-A & 40-A typical - 85°C, 100-A typical only For other case temperatures $V_D = V_{DS(on)}$, $R_L = 125\Omega$, $T_C = 110^\circ\text{C}$, 100-A typical - 100°C, 100-A typical	V_{GT}	-	1.35	2.5	V
		-	1.0	3.4"	
		0.2	-	-	

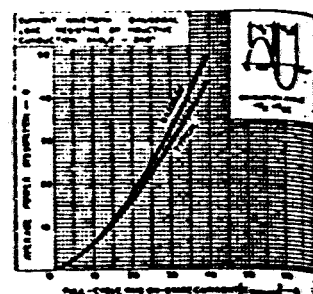


Fig. 1 - Power dissipation vs. on-state current for 2N5441-46, and TG420 series.

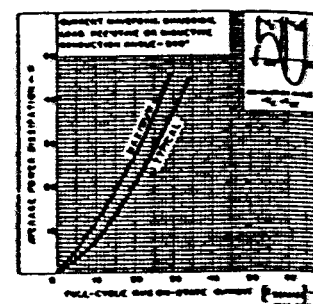


Fig. 2 - Power dissipation vs. on-state current for TG401, TG411, TG421 series.

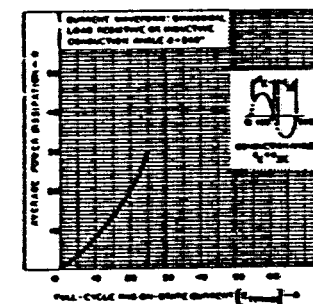


Fig. 3 — Power dissipation vs. on-state current for 2N5006-2N5009.

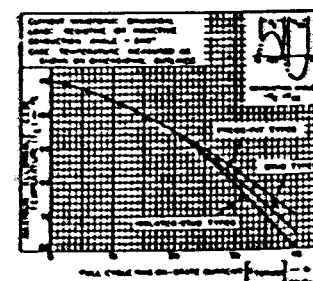


Fig. 4 - Maximum allowable case temperature vs. on-state current for 2N5441-46 and 6420 series.

T6400, T6401, T6410, T6411, T6420, T6421 Series (Includes 2N5441-2N5446, 2N5806-2N5809)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at Maximum Ratings Otherwise Specified and at mid-range Case Temperature (T_C)

CHARACTERISTICS	SYMBOL	LIMITS			UNITS
		MIN.	TYP.	MAX.	
Gate Trigger Voltage: 60					
D - 12 V dc, R _g = 26 Ω					
Triggering Modes 1 ^a , 10 ^b , 4 ^c 125 A typical, T _C = 25°C	V _{GT}	-	2	25	V
Triggering Modes 1 ^a , 10 ^b , 4 ^c 125 A typical, T _C = 75°C		-	7.6	4 ^c	
Triggering Modes 1 ^a , 10 ^b , 4 ^c 125 A typical, T _C = 175°C		0.95	-	-	
Gate Controlled Turn-On Time: Delay Time - Rise Time					
D - V _{DRM} = 100 V, I _{GT} = 200 mA, t _r = 0.1 μs	t _g	-	17	3	μs
I _T = 80 A (peak), T _C = 25°C 100 A typical		-	17	3	
D - V _{DRM} = 100 V, I _{GT} = 200 mA, t _r = 0.1 μs		-	17	3	
I _T = 45 A (peak), T _C = 25°C 100 A typical		-	16	-	
D - V _{DRM} = 100 V, I _{GT} = 150 mA, t _r = 0.1 μs		-	16	-	
I _T = 80 A (peak), T _C = 25°C 125 A typical		-	16	-	
Normal Resistance, Junction to Case					
Steady State	R _{θJC}	-	-	0.6 ^d	°C/W
Press-fit types		-	-	0.9 ^e	
Stud types		-	-	1.25 ^f	
Stud types (25 A types only)		-	-	1	
Isolated stud types					
Transient (Press-fit & stud types)					
Normal Resistance, Junction to Ambient					
Steady State (25 A types only)	R _{θJA}	-	-	50 ^g	

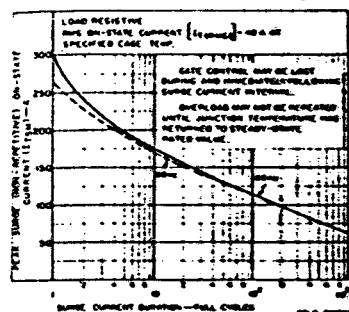
^a In accordance with JEDEC registration data format G5-M, R0F 21 field for the JEDEC G2N Series types.^b For either polarity of main terminal 2 voltage (V_{MT2}) with reference to main terminal 1.^c For either polarity of gate voltage (V_{GT}) with reference to main terminal 1.

Fig. 7 - Peak surge on-state current vs. surge current duration for 2N5441-46, and T6420 series.

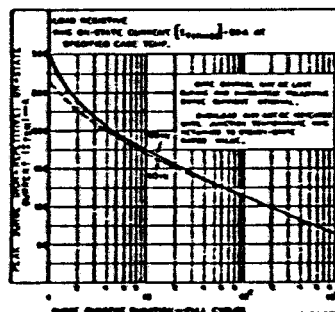


Fig. 8 - Peak surge on-state current vs. surge current duration for T6401, T6411, T6421 series.

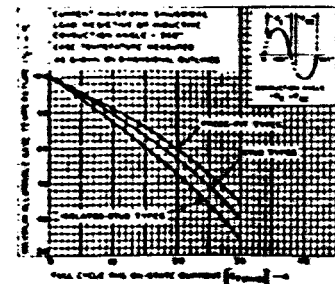


Fig. 5 - Maximum allowable case temperature vs. on-state current for T6401, T6411, T6421 series.

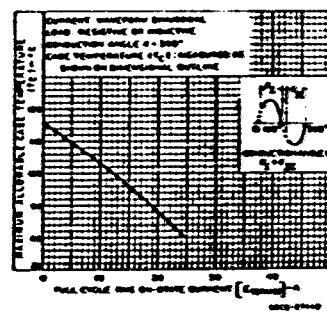


Fig. 6 - Maximum allowable case temperature vs. on-state current for 2N5806-2N5809.

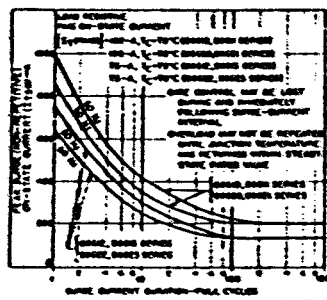


Fig. 9 - Peak surge on-state current vs. surge current duration for 2N5806-2N5809.

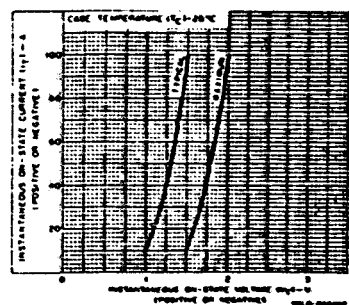


Fig. 10 - On-state current vs. on-state voltage for 2N5441-46, and T6420 series.

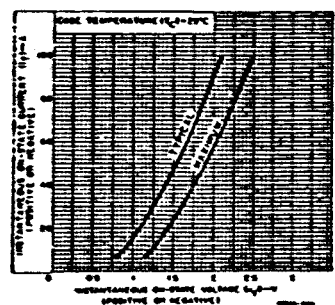


Fig. 11 - On-state current vs. on-state voltage for T6401, T6411, T6421 series.

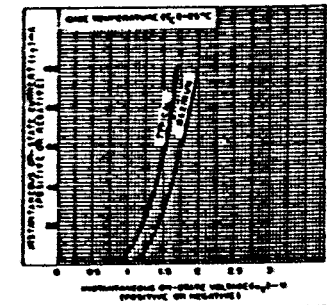


Fig. 12 - On-state current vs. on-state voltage for 2N5806-2N5809.

T6400, T6401, T6410, T6411, T6420, T6421 Series
(Includes 2N5441-2N5446, 2N5806-2N5809)

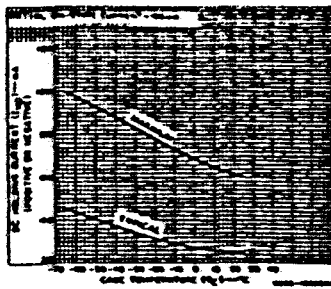


Fig. 13 - DC holding current vs. case temperature for 2N5441-46, T6420, T6401, T6411, T6421 series.

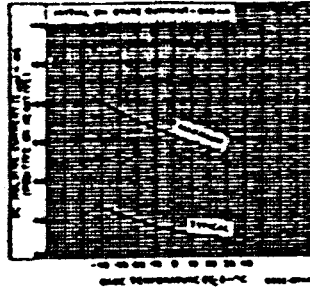


Fig. 14 - DC holding current vs. case temperature for 2N5806-2N5809 series.

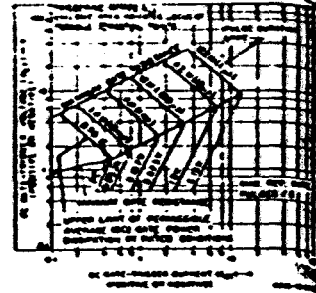


Fig. 15 - Gate-trigger characteristics and limiting conditions for determination of permissible gate-trigger pulses for 2N5441-46, T6420, T6401, T6411, T6421 series.

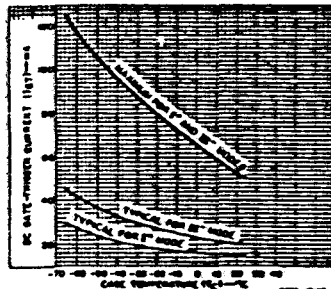


Fig. 16 - DC gate-trigger current vs. case temperature (I_1 & I_2) model for 2N5441-46, T6420, T6401, T6411, T6421 series.

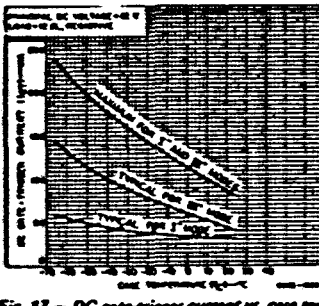


Fig. 17 - DC gate-trigger current vs. case temperature (I_1 & I_2) model for 2N5441-46, T6420, T6401, T6411, T6421 series.

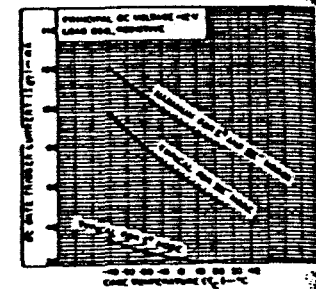


Fig. 18 - DC gate-trigger current vs. case temperature (I_1 & I_2) model for 2N5806-2N5809 series.

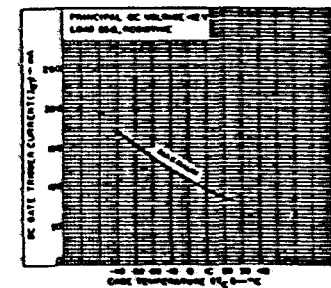


Fig. 19 - DC gate-trigger current vs. case temperature (I_1) model for 2N5806-2N5809 series.

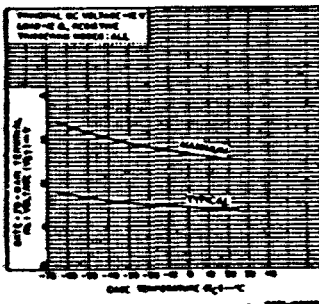


Fig. 20 - DC gate-trigger voltage vs. case temperature for 2N5441-46, T6420, T6401, T6411, T6421 series.

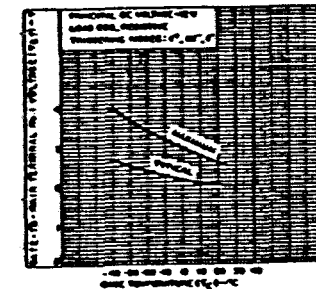


Fig. 21 - DC gate-trigger voltage vs. case temperature for 2N5806-2N5809 series.

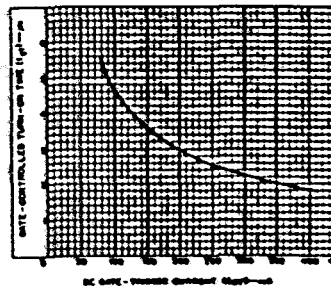


Fig. 22 - Turn-on time vs. gate-trigger current for 2N5441-46, T6420, T6401, T6411, T6421 series.

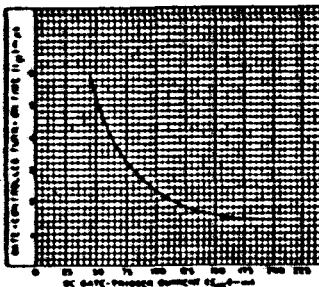


Fig. 23 - Typical turn-on time vs. gate-trigger current for 2N5806-2N5809 series.

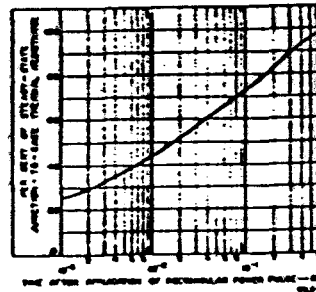
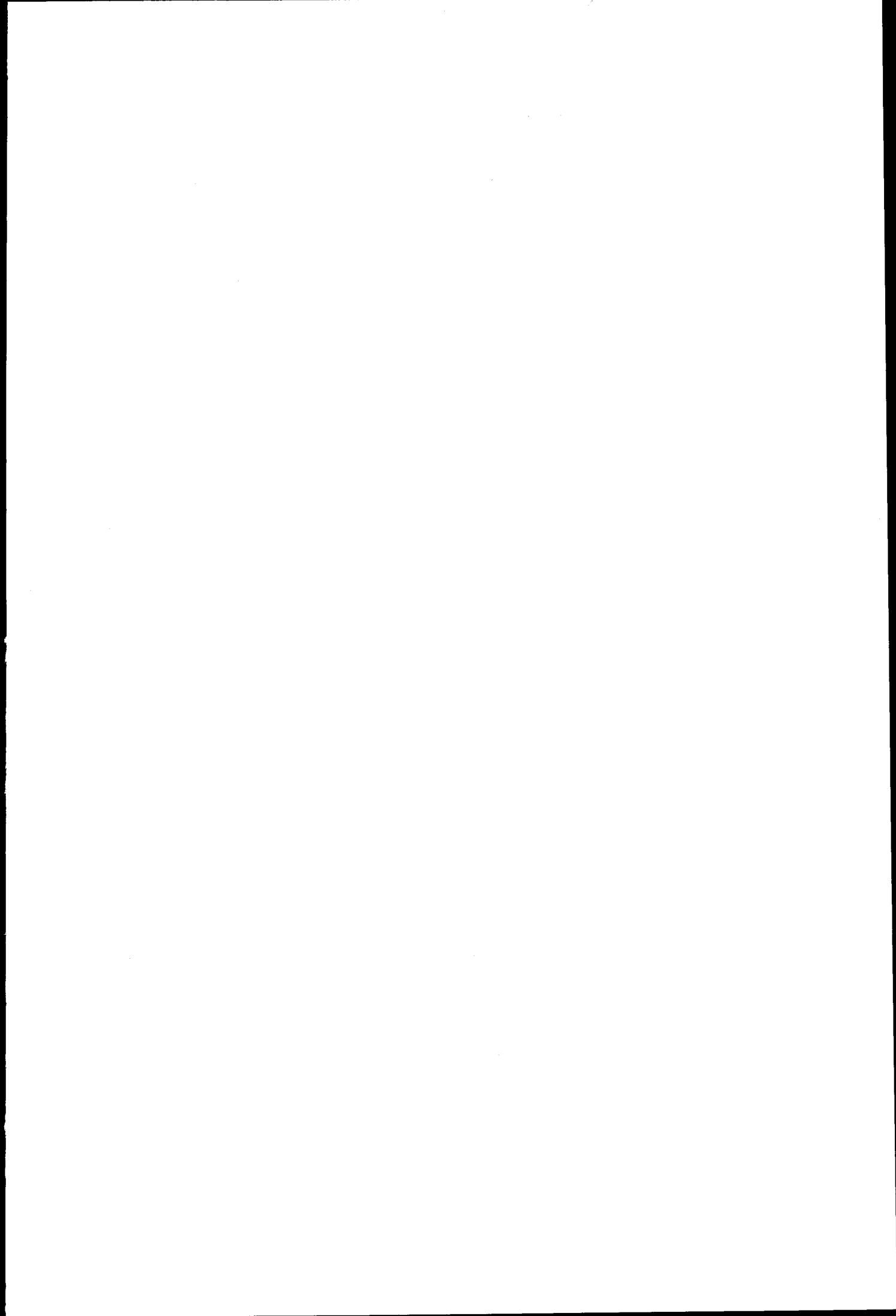


Fig. 24 - Transient junction-to-case thermal resistance vs. time for press-fit and solder types.



25 FEB 1993

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO ITS

EE-1799 TUGAS AKHIR - 6 SKS

Nama Mahasiswa : Ary Sudibyo
Nomor Pokok : 290 220 1576
Bidang Studi : Teknik Sistem Tenaga
Tugas Diberikan : Semester Ganjil 1992
Tugas Diselesaikan : Semester Genap 1993
Dosen Pembimbing : Dr.Ir. Soebagio
Judul Tugas Akhir :

ELEKTRONIK STARTING SWITCH MOTOR INDUKSI
SATU PHASA 1/2 HP STARTING KAPASITOR

Uraian Tugas Akhir:

Motor induksi satu phasa banyak dipergunakan pada peralatan rumah tangga maupun industri kecil yang mempunyai daya lebih kecil dari 1 kW. Motor induksi satu phasa ini pada waktu mempunyai kopel mula ≈ 0 , membutuhkan arus starting yang besar, tetapi motor tidak berputar. Untuk menaikkan kopel dipasang kumparan bantu dan kapasitor. Pada saat motor telah berputar dengan kecepatan $\approx 80\%$ kecepatan sinkron, kapasitor dilepas oleh peralatan starting mekanik yaitu sentrifugal switch.

Pada Tugas Akhir ini membuat suatu peralatan elektronik yang menggantikan fungsi dari starting switch dengan menggunakan TRIAC untuk motor induksi 1/2 Hp satu phasa starting kapasitor.

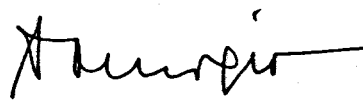
Surabaya, 27 Januari 1993

Menyetujui
Bidang Studi T. Sistem Tenaga
Koordinator

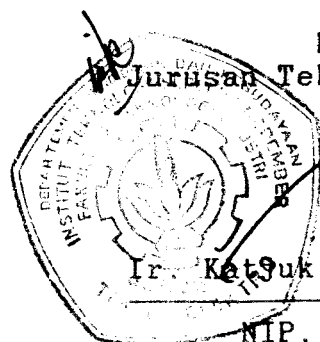

Ir. Sidarjanto

NIP. 130 532 009


Dosen Pembimbing,


DR. Ir. Soebagio

NIP. 130 325 697



Mengetahui,
Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS
Ketua


Ir. Ketuk Astrowulan MSEE

NIP. 130 687 438

22/93
12

USULAN TUGAS AKHIR

I. JUDUL TUGAS AKHIR : ELEKTRONIK STARTING SWITCH
MOTOR INDUKSI SATU PHASA
1/2 HP STARTING KAPASITOR

II. RUANG LINGKUP ILMU

PENGETAHUAN

- :- Mesin Arus Bolak-Balik
- Elektronika Sistem Tenaga
- Penggunaan Motor Listrik

III. LATAR BELAKANG

: Motor induksi satu phasa sebagai motor penggerak serba guna untuk peralatan-peralatan pada industri kecil dan rumah tangga yang mempunyai daya lebih kecil dari 1 kW. Motor induksi satu phasa ini saat power supply terpasang mempunyai kopel mula ≈ 0 membutuhkan arus starting yang tinggi tetapi masih belum berputar. Untuk menaikkan kopel mula ini maka dipasang kumparan bantu dan kapasitor. Pada saat motor sudah berputar dengan kecepatan $\approx 80\%$ kecepatan sinkron, kapasitor tersebut dilepas kembali oleh peralatan mekanik yaitu sentrifugal switch. Dengan sentrifugal switch mekanik ini kita tidak dapat mengatur waktu pelepasan kapasitor starting. Dengan mengganti sentrifugal switch mekanik dengan elektronik starting switch maka dapat diatur pelepasannya. Sehingga dapat diperoleh starting yang lebih optional dan switch






mekanik yang membutuhkan perawatan dapat ditiadakan.

IV. PERMASALAHAN : Dalam tugas akhir ini akan dibahas pembuatan peralatan starting switch untuk motor induksi satu phasa dengan daya 1/2 Hp memakai starting kapasitor

V. LANGKAH-LANGKAH :

1. Studi Literatur
2. Mempelajari kerja motor induksi satu phasa
3. Mempelajari dan menganalisa pemakaian TRIAC
4. Pembuatan alat
5. Penulisan buku

VI. JADWAL KEGIATAN : Jadwal kegiatan direncanakan selesai dalam waktu enam bulan dengan jadwal sebagai berikut :

Kegiatan	Bulan Ke					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						

BIODATA



Penulis dilahirkan di Surabaya 1 Juni 1967,
dengan nama ARY SUDIBYO.

Penulis saat ini bertempat tinggal di Jl.
Tumbal Negara no. 42 Malang. Terdaftar
sebagai mahasiswa Fakultas Teknologi
Industri Jurusan Teknik Elektro Bidang Studi Teknik Sistem
Tenaga Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya,
dengan nomor pokok 2902201576.

Pendidikan yang pernah diperoleh :

1. SD Hang Tuah XII Surabaya, lulus tahun 1980.
2. SMP Negeri 7 Surabaya, lulus tahun 1983.
3. SMA Negeri 7 Surabaya, lulus tahun 1986.
4. D3 Teknik Elektro FNCT-ITS, lulus tahun 1989.
5. Tahun 1990 terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas
Teknologi Industri Jurusan Teknik Elektro Bidang
Studi Teknik Sistem Tenaga Institut Teknologi
Sepuluh Nopember Surabaya, program Lintas
Jalur.